



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KATRI SADEHARJU  
MAAKAASUKÄYTTÖISTEN POLTTOMOOTTORIVOIMALAITOS-  
TEN PAKOKAASUJEN LÄMMÖNTALTEENOTTO  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 4. kesäkuuta 2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

**SADEHARJU, KATRI:** Maakaasukäyttöisten polttomoottorivoimalaitosten pakokaasujen lämmöntalteenotto

Diplomityö, 110 sivua, 5 liitesivua

Lokakuu 2014

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: moottorivoimalaitos, sähkön- ja lämmön yhteistuotanto, pakokaasut, lämmöntalteenotto, latenttilämpö

Pakokaasut ovat polttomoottorivoimalaitoksen suurin hukkalämpövirta, joten niiden lämmöntalteenottoa tehostamalla parannetaan laitoksen energiatehokkuutta ja nostetaan kokonaishyötysuhdetta.

Työn taustaluvussa tarkastellaan Euroopan energiamarkkinoita ja poliittista toimintaympäristöä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten ja maakaasukäyttöisten polttomoottorivoimalaitosten osalta. Energiatehokkuusvaatimusten motivoimana työssä selvitetään maakaasumoottorivoimaloiden lämmöntalteenoton nykyisiä käytäntöjä sekä tutkitaan lisälämmön talteenottopotentiaalia pakokaasuista matalilla lämpötiloilla.

Tyypillisesti moottorivoimalaitoksissa pakokaasuista hyödynnetään helposti talteen otettava lämpöenergia korkeissa lämpötiloissa ja loput hukataan ympäristöön. Pakokaasut sisältävät kuitenkin edelleen suuren määrän lämpöenergiaa sekä kaasuseoksen tuntuvana lämpönä että vesihöyryyn sitoutuneena latenttilämpönä, joiden talteenottomahdollisuuksia työssä selvitetään. Aiempiin tutkimuksiin perustuen luodaan laskentamalli epäsuoran menetelmän lauhduttavan lämmönsiirtimen lämmönsiirtopintojen mitoittamiseen sekä lisätään laskenta pakokaasukattiloiden mitoitusohjelmaan. Lopuksi mitoitetaan lauhduttavat lämmönsiirtimet neljään olemassa olevaan maakaasumoottorivoimalaitokseen ja arvioidaan esimerkkitapausten avulla lauhduttavien lämmönsiirtimen kannattavuutta Euroopan toimintaympäristössä.

Pakokaasujen sisältämää latenttilämpöä voidaan ottaa hyötykäyttöön jäähdyttämällä ne kastepisteen alle, jolloin vesihöyry alkaa lauhtua vedeksi ja luovuttaa latenttilämpöä. Tämä voidaan toteuttaa joko jäähdytysveden suorassa kontaktissa pakokaasuihin pesuriityypisillä savukaasulauhduttimilla tai epäsuoralla menetelmällä lämmönsiirtopintojen avulla. Pakokaasujen lämmöstä jopa puolet voi olla sitoutunut latenttilämpönä vesihöyryyn, joten lauhduttavilla lämmönsiirtimillä voidaan nostaa voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta jopa kymmenillä prosenteilla. Lauhduttavien lämmönsiirtimien haasteena on tarve toisiopuolen vesipiirin alhaiselle lämpötilalle. Toisin sanoen jäte- lämmölle tulee löytyä lämmönkäyttökohde, joka toimii matalilla lämpötiloilla, jotta paluuv veden lämpötila on pakokaasujen kastepisteen alapuolella. Mahdollisia matalan lämpötilatason jäte- lämmön hyötykäyttökohteita ovat kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotanto lämpöpumppujen ja absorptiojäähdyttimien avulla sekä erilaiset lämmityskohdet kuten kasvihuoneet. Esimerkkitapausten kannattavuusarvioinnissa havaittiin, että ruostumattomasta teräksestä valmistettujen vesiputkityyppisten lauhduttavien lämmönsiirtimien takaisinmaksuajat ovat perinteisiin pakokaasukattiloihin verrattuna pidempiä, mutta voimalaitosinvestointeihin suhteutettuna edelleen verrattain lyhyitä, joten tuotteen edelleen kehittäminen on perusteltua.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

**SADEHARJU, KATRI:** Exhaust gas waste heat recovery in power plants based on natural gas fuelled reciprocating engines

Master of Science Thesis, 110 pages, 5 Appendix pages

October 2014

Major: Power Plant and Combustion Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: reciprocating engine power plant, combined heat and power, exhaust gas, waste heat recovery, latent energy

Exhaust gas flow is the biggest waste heat source in a power plant based on reciprocating engines, hence improving its heat recovery enhances the energy efficiency and total efficiency of the plant.

As a background the European energy market and political environment are reviewed from combined heat and power generation's and natural gas fuelled engine based power plants' point of view. Motivated by the energy efficiency requirements this thesis discusses current practices of the heat recovery in the natural gas engine power plants and studies the heat recovery potential of the exhaust gases at low temperatures.

Typically the exhaust gas waste heat is recovered in the high temperature range in the engine power plants and the rest is wasted to the environment. Yet the exhaust gas still contains a lot of energy in the form of sensible heat and latent heat comprised in the water vapor. The recovery potential of this low temperature heat is studied in the thesis. A calculation method for dimensioning an indirect condensing heat exchanger is developed and integrated into a dimensioning tool for exhaust gas waste heat recovery boilers. Lastly condensing heat exchangers are dimensioned for four existing natural gas engine power plants and the feasibility of such heat exchangers is evaluated through these examples.

The latent heat can be recovered by cooling the exhaust gas down below the dew point after which the water vapor starts to condense and release the latent heat. This can be conducted through direct water contact exhaust gas scrubbers or via an indirect method using heating surfaces. Latent heat comprises up to a half of the heat energy in the exhaust gas, hence condensing heat exchangers may increase the total efficiency of a power plant by more than ten percent. One of the challenges about condensing heat exchangers is the low temperature of the water circuit. A heat demand that operates at a low temperature range needs to be found, so that the return water temperature lies below the exhaust gas dew point. Potential low-grade waste heat applications are district heating and cooling together with heat pumps and absorption cooling as well as various heating demands such as greenhouses. In the feasibility study of the dimensioned water tube type condensing heat exchangers it was discovered that the payback period is longer than that of the traditional exhaust gas boiler, but still rather short in terms of power plant investments. This leads to conclude that further development of the condensing heat exchanger product is justifiable.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Alfa Laval Aalborg Oy:ssa. Työtä ohjasi diplomi-insinööri Pasi Aaltonen, jota kiitän hyödyllisistä neuvoista ja kehitysehdotuksista sekä kiinnostuksesta työtä kohtaan. Haluan kiittää Alfa Laval Aalborg Oy:tä, työtovereita sekä esimiestäni, diplomi-insinööri Pekka Läiskää mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta, kannustuksesta ja itsenäisen työn tukemisesta niin diplomityön kuin aikaisempien kesätöidenkin aikana sekä etätöiden järjestymisestä. Lisäksi kiitän professori Risto Raikoa keskusteluista, vinkeistä sekä palautteesta, jonka avulla sain kehitettyä diplomityötä eteenpäin.

Suuret kiitokset kuuluvat puolisololleni, perheelleni ja ystävilleni, jotka ovat tukeet ja kannustaneet minua elämäni ja opintojeni aikana. Suurin kiitos ja kunnia kuuluu kaiken Luojalles.

Tampereella, 26. elokuuta 2014

Katri Sadeharju

# SISÄLLYS

Tiivistelmä .....	i
Abstract .....	ii
Lyhenteet ja merkinnät.....	vi
1 Johdanto .....	1
1.1 Tavoitteet.....	1
1.2 Työn rakenne.....	2
2 Yhteistuotannon toimintaympäristö Euroopassa.....	4
2.1 Energiapolitiikkaa Euroopassa.....	4
2.1.1 Energiatehokkuusdirektiivi ja sen vaikutukset energiatuotantoon .....	4
2.1.2 Energiarakenteen kehityssuuntia vuoteen 2030 ja 2050.....	6
2.2 Energiamarkkinat Euroopassa.....	8
2.2.1 Uusiutuvat energiamuodot.....	9
2.2.2 Uusiutuvien energiamuotojen tuet .....	11
2.3 Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto Euroopassa.....	12
2.3.1 Yhteistuotannon tuet Euroopassa.....	14
2.3.2 Yhteistuotantosähkön ja -lämmön tekniikat ja käyttökohteet.....	15
2.3.3 Joustavuus energiantuotannossa .....	17
2.4 Maakaasu sähkön- ja lämmöntuotannossa Euroopassa.....	18
2.4.1 Maakaasu polttoaineena.....	19
2.4.2 Maakaasun käyttö Euroopassa nykyään .....	20
2.4.3 Arvioita tulevaisuuden maakaasun käytöstä Euroopassa .....	21
2.5 Yhteenveto toimintaympäristöstä.....	24
3 Kaasumoottorivoimalaitos .....	25
3.1 Moottorivoimalaitos.....	25
3.1.1 Sähköntuotantoon optimoidut moottorivoimalat.....	27
3.1.2 Yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon optimoidut moottorivoimalat.....	28
3.2 Kaasu- ja monipolttoainemoottorit .....	29
3.2.1 Kipinäsytytteiset kaasumoottorit .....	30
3.2.2 Puristussytytteiset kaasu- ja monipolttoainemoottorit.....	30
3.2.3 Moottoreiden apulaitteet ja –järjestelmät .....	32
4 Moottorivoimalaitosten lämpövirrat .....	33
4.1 Moottorin jäähdytys ja lämmöntalteenottopotentiali .....	33
4.1.1 Ahtoilman jäähdytys .....	35
4.1.2 Sylinterivaipan jäähdytys.....	35
4.1.3 Voiteluöljyn jäähdytys.....	36
4.1.4 Generaattorin jäähdytys .....	36
4.1.5 Yhteenveto moottorin hukkalämpövirroista .....	36
4.2 Pakokaasujen lämmöntalteenotto.....	38
4.2.1 Lämmöntalteenoton periaate.....	39

4.2.2	Kattila- ja lämmönvaihdkonstruktiot.....	44
4.2.3	Lämpötila- ja painetasot.....	46
4.2.4	Lämmöntalteenottokattilan apulaitteet .....	48
4.2.5	Pakokaasujen ominaisuudet.....	49
4.2.6	Lämmöntalteenoton reunaehdot ja häviöt.....	50
4.3	Moottorin jäähdytysveden ja savukaasujen lämmönsiirtopiirien yhdistäminen 51	
5	Pakokaasujen latenttilämmön talteenotto.....	53
5.1	Pakokaasujen ominaisuuksien ja energian laskenta.....	53
5.2	Latenttilämpö pakokaasuissa .....	54
5.2.1	Lauhduttavan lämmönsiirtimen lämmöntalteenottopotentiali .....	57
5.2.2	Vesikastepiste .....	59
5.3	Lauhtuminen ja lämmönsiirto pakokaasujen lämmöntalteenotossa.....	62
5.3.1	Lauhtuminen kondensoivassa lämmönsiirtimessä.....	63
5.3.2	Lämmön- ja massansiirron laskentamalli lauhduttavassa lämmönsiirtimessä.....	65
6	Lauhduttavan lämmönsiirtimen tekniikkaa ja sovelluskohteita.....	72
6.1	Latenttilämmön talteenoton teknisiä ratkaisuja .....	72
6.2	Happokorroosio matalan lämpötilatason lämmöntalteenotossa.....	74
6.2.1	Rikkiyhdisteet pakokaasuissa .....	74
6.2.2	Happokastepiste .....	76
6.2.3	Happokorroosio ja materiaalivalinnat.....	78
6.3	Jätelämmön hyötykäyttömahdollisuudet.....	81
6.3.1	Kaukolämpö.....	81
6.3.2	Kaukojäähdytys .....	85
6.3.3	Muita hyötykäyttökohteita .....	87
6.4	Yhteenveto lauhdelämmön talteenotosta .....	88
7	Lauhduttavan lämmönsiirtimen lisääminen mitoitusohjelmaan ja esimerkkitapausten laskenta.....	89
7.1	Lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoitus .....	89
7.2	Esimerkkitapausten laskenta .....	91
7.2.1	Esimerkkivoimalaitosten ja käyttökohteiden lähtötiedot.....	91
7.2.2	Matalan lämpötilatason jätelämpökattilan mitoitus .....	92
7.3	Tulokset ja arviointi .....	94
7.4	Kannattavuuden arviointi .....	95
8	Yhteenveto ja johtopäätökset .....	98
	Lähteet.....	100
	Liitteet .....	110

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

### Kirjainlyhenteet

ADT	Acidic dew point, happokastepiste
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty sähkön- ja lämmön- tuotanto
COP	Coefficient of Performance, jäähdytyskoneen tehokerroin
DF	Dual fuel (engine), kaksoispolttoaine(moottori)
EU	Euroopan unioni
GD	Gas-diesel (engine), kaasudiesel(moottori)
HT	High temperature, korkea lämpötilataso
IEA	International Energy Agency, Kansainvälinen energiajärjes- tö
LCV, LHV	Lower calorific value, lower heating value, alempi lämpöarvo, tehollinen lämpöarvo
LMTD	Logarithmic mean temperature difference, keskimääräinen logaritminen lämpötilaero
LT	Low temperature, matala lämpötilataso
ORC	Organic Rankine Cycle, orgaanisella kiertoaineella toimiva Rankine-kiertoprosessi
SG, SI	Spark-ignited gas (engine), kipinäsytytteinen kaasumoottori
TQ	lämpötila-lämpöteho

### Suureet ja muuttujat

$c_p$	ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa
$d$	halkaisija
$f$	kitkakerroin
$h$	ominaisentalpia / lämmönsiirtokerroin
$l$	faasinmuutosentalpia
$L$	pituus
$m, \dot{m}$	massa, massavirta
$M$	moolimassa
$n, \dot{n}$	ainemäärä, ainemäärävirta
$Nu$	Nusseltin luku
$p$	paine
$Pr$	Prandtlin luku
$q$	lämpövirta
$Re$	Reynoldsin luku
$T$	lämpötila
$U$	lämmönläpäisykerroin
$x$	mooliosuus

## Kreikkalaiset aakkoset

$\alpha$	lämmönsiirtokerroin
$\lambda$	lämmönjohtumiskerroin

## Yksiköt

m-%	massaosuus prosentteina
$\text{m}^3_{\text{N}}$	normikuutiometri, kuutiometri ideaalikaasua standardiolosuhteissa (0 °C, 1,01325 bar)
mol-%	mooliosuus prosentteina
Mtoe	miljoonaa öljykvivalenttitonnia
ppm	parts per million, miljoonasosa
til-%	tilavuusosuus prosentteina

## Alaindeksit

b	savukaasun bulkkivirta
e	sähkö (electricity)
eko	ekonomaiseri, veden esilämmitin
höyr	höyrystin
kalvo	lauhdekalvo
kok	kokonais-
konv	konvektio, konvektiivinen
kyll	kyllästymis-
lauht	lauhtuminen
lto	lämmöntalteenotto
m	keskiarvo (mean)
p	putki
pk	pakokaasu
rp	rajapinta
s	sisä-
tul	tulistin
u	ulko-
v	vesi
th	lämpö (thermal)

## Euroopan maiden lyhenteet

AT	Itävalta
BE	Belgia
BG	Bulgaria
CH	Sveitsi
CY	Kypros
CZ	Tsekki
DE	Saksa



DK	Tanska
EE	Viro
ES	Espanja
FI	Suomi
FR	Ranska
GR	Kreikka
HU	Unkari
IE	Irlanti
IS	Islanti
IT	Italia
LT	Liettua
LU	Luxemburg
LV	Latvia
MT	Malta
NL	Alankomaat
NO	Norja
PL	Puola
PT	Portugali
RO	Romania
SE	Ruotsi
SI	Slovenia
SK	Slovakia
UK	Iso-Britannia

# 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen ehkäisy, energiavarojen säästeliäs käyttö sekä uusiutuvien energiamuotojen käytön lisääminen ovat tämän hetken näkyvimpiä energiapolitiikan tavoitteita. Kansallisella ja kansainvälisellä lainsäädännöllä pyritään vaikuttamaan yhteiskunnan primäärienergian käyttöön, päästöjen vähentämiseen sekä pyritään turvaamaan tasainen energiansaanti. Lainsäädäntö ja poliittiset tavoitteet luovat pohjan energiamarkkinoiden muutoksille. Euroopan unionin ilmastopolitiikka ja energiatehokkuustavoitteet ovat vaikuttaneet uusiutuvien energiamuotojen lisääntymiseen energiakentässä sekä sähkön ja lämmön yhteistuotannon edistämiseen. Energiantuotantorakenne Euroopassa muuttuu; heilahtelevan tuuli- ja aurinkovoiman osuus kasvaa samalla, kun hiili- ja ydinvoimaa pyritään vähentämään. Energiarakenteen muutokset lisäävät peruskuorman ja säätösähkön tarvetta, mikä motivoi tässä diplomityössä selvittämään polttomoottorivoimalaitoksien mahdollisuuksia osana sähkön- ja lämmöntuotannon tulevaisuutta Euroopassa. Tarkastellaan seuraavaksi työn tavoitteita, rajauksia ja rakennetta.

## 1.1 Tavoitteet

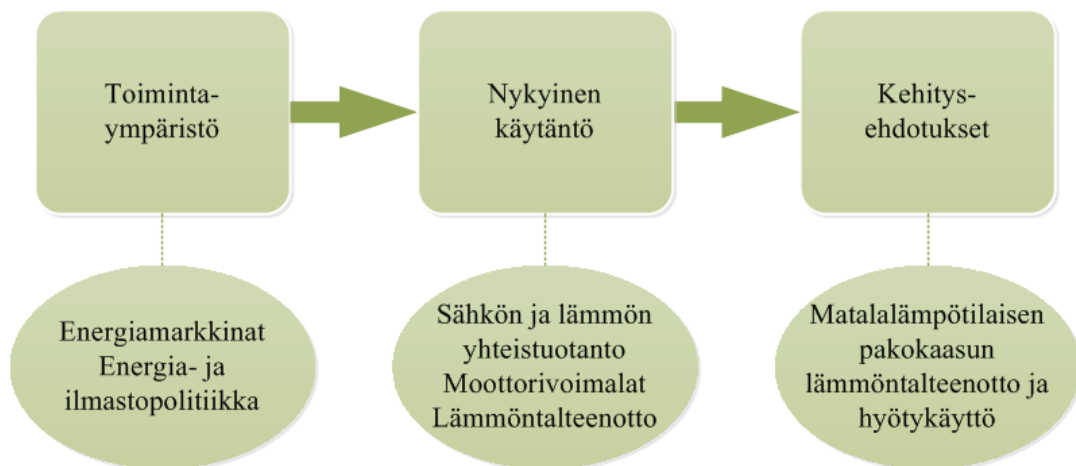
Tämän diplomityön yhtenä tavoitteena on tarkastella Euroopan energiamarkkinatilannetta ja poliittista toimintaympäristöä sähkön ja lämmön yhteistuotannon kannalta sekä selvittää polttomoottorivoimalaitosten soveltuvuutta nykyiseen energiantuotantorakenteeseen. Pääasiassa keskitytään vain maakaasua käyttäviin polttomoottorivoimalaitoksiin, sillä se on muita fossiilisia energianlähteitä puhtaampi polttoaine ja tuottaa myös vähemmän hiilidioksidia korkean vetypitoisuutensa ansiosta. Näin ollen maakaasua käytettäneen energiantuotannon osaratkaisuna matkalla kohti hiilineutraalia tulevaisuutta sekä perus- että säätövoiman tuotannossa.

Energiatehokkuusvaatimukset sekä huoli ilmastonmuutoksesta lisäävät mielenkiintoa myös vaikeammin hyödynnettäviin energiansäästö- ja energiantuotantomahdollisuuksiin. Tämän diplomityön toisena tavoitteena on selvittää polttomoottorivoimalaitosten hukkalämpövirtojen talteenottopotentiaalia ja erityisesti tarkastella, voidaanko pakokaasuista ottaa nykyistä enemmän lämpötehoa talteen kannattavalla tavalla. Tavoitteena on tarkastella nykyisin yleisesti käytössä olevia lämmöntalteenottomenetelmiä sekä selvittää, kuinka paljon pakokaasut sisältävät lämpöenergiaa vielä perinteisestä lämmöntalteenottojärjestelmästä poistuessaan ja miten tätä lämpöä voitaisiin ottaa talteen. Pakokaasun sisältämään vesihöyryyn on sitoutunut huomattava määrä latenttilämpöä, jonka talteenoton potentiaalia halutaan tarkemmin selvittää. Lisäksi tavoitteena on selvittää moottorivoimaloista talteenotetun matalalämpötilaisen jätelämmön hyötykäyt-

tömahdollisuuksia Euroopassa sähkön ja lämmön yhteistuotannon yhteydessä, jotta on mielekästä tarkastella latenttilämmön talteenoton teknisiä ratkaisuja ja kannattavuutta.

## 1.2 Työn rakenne

Työn rakennetta hahmotellaan kuvassa 1.1. Työ etenee taustatekijöiden kartoittamisesta nykyiseen käytäntöön ja lopuksi selvitetään mahdollisia parannusehdotuksia nykyiseen tilanteeseen.



**Kuva 1.1** Työn eteneminen

Aloitetaan työ selvittämällä energiantuotannon, etenkin sähkön ja lämmön yhteistuotannon toimintaympäristöä Euroopassa luvussa 2. Selvitetään energiantuotannon poliittisia taustatekijöitä, jotka vaikuttavat energiamarkkinoiden muutoksiin nyt ja lähitulevaisuudessa. Tarkastellaan keskeisten, erilaisten eurooppalaisten energiamarkkinoiden rakennetta yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon kannalta sekä tarkastellaan maakaasun käyttöä ja arvioita sen merkityksestä tulevaisuudessa.

Perehdytään tämän jälkeen luvussa 3 maakaasukäyttöisten polttomoottorivoimaitosten toimintaan sekä sen mahdollisuuksiin sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Selvitetään luvussa 4 tarkemmin polttomoottoreiden hukkalämpövirtoja sekä niiden lämmöntalteenottopotentiaalia. Syvennyttään polttomoottorin pakokaasujen lämmöntalteenottoon, tekniikkaan ja mahdollisuuksiin sekä rajoituksiin.

Selvitetään tämän jälkeen luvussa 5 pakokaasujen sisältämän vesihöyryn latenttilämmön määrää, talteenottopotentiaalia ja lämpötilatasoja. Luodaan laskentamalli kuvaamaan pakokaasujen matalan lämpötilatason tuntuvan ja latentin lämmön lämmönsiirtoa sekä vesihöyryn massansiirtoa ja lauhtumista. Luvussa 6 keskitytään lauhtuttavan lämmönsiirron teknisiin ratkaisuihin ja haasteisiin sekä tarkastellaan mahdollisia matalalämpötilaisen jätelämmön hyötykäyttökohteita. Lopuksi tarkastellaan esimerkkituotteen avulla lauhtuttavan lämmönsiirtimen mitoitusta ja arvioidaan sen kannattavuutta.

Työssä yhdistyvät kirjallisuusselvitys ja kerätyn aineiston soveltaminen käytäntöön. Aluksi selvitetään laajasti kirjallisuuden avulla maakaasukäyttöisten polttomootto-  
reiden soveltuvuutta lähitulevaisuuden energiantuotantorakenteeseen sekä polttomootto-  
reiden lämmöntuotantoa ja lämmöntalteenottopotentialia. Tämän jälkeen työssä sovel-  
letaan kirjallisuudessa ja aiemmissa tutkimuksissa kehitettyjä malleja ja teknisiä ratkai-  
suja ja kehitetään laskentamalli sekä mitoitusohjelma pakokaasujen matalan lämpötila-  
tason lämmöntalteenottoon tarkoitetulle lauhduttavalle lämmönsiirtimelle. Laskelmiin  
perustuen arvioidaan latenttilämmön talteenoton kannattavuutta Euroopan toimintaym-  
päristössä ja tehdään päätelmiä lauhduttavan lämmönsiirtimen edelleenkehityksen tar-  
peista.

## 2 YHTEISTUOTANNON TOIMINTAYMPÄRISTÖ EUROOPASSA

Tarkastellaan tässä luvussa yhteistuotannon toimintaympäristöä Euroopassa. Tutkitaan Euroopan unionin antamaa Energiatehokkuusdirektiiviä sekä sen vaikutuksia energiantuotantoon Euroopassa sekä tarkastellaan energiarakenteen kehityssuuntia pitkällä aikavälillä. Yhteistuotanto perustuu pitkälti fossiilisiin polttoaineisiin, joista tässä työssä rajoittaudutaan maakaasuun. Toimintaympäristön arvioinnin kannalta on mielekästä tutkia maakaasun käyttöä Euroopassa nykyisin ja arvioita tulevaisuudesta. Tarkastellaan myös yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa Euroopassa.

### 2.1 Energiapolitiikkaa Euroopassa

Euroopan unionin säädökset, kansainväliset ilmastopoliittiset sopimukset sekä valtioiden lainsäädännöt vaikuttavat suurelta osin energiapolitiikkaan ja sitä kautta energiantuotantoon, jakeluun ja kulutukseen Euroopassa. Energiantuotannon ja etenkin yhteistuotannon toimintaympäristöä luovina tärkeimpiä näistä ovat Eurooppa 2020 -strategian tavoitteet, EU:n energiatehokkuusdirektiivi vuodelta 2012 sekä EU:ssa asetetut pitkän tähtäimen tavoitteet, joita tarkastellaan tässä luvussa.

Euroopan unionin energia- ja ilmastotavoitteina on vähentää energiankulutusta ja tehostaa energiankäyttöä, vähentää kasvihuonekaasupäästöjä sekä lisätä uusiutuvien energiamuotojen käyttöä. Nämä tavoitteet on kirjattu Eurooppa 2020 -strategiaan. Tavoitteena on vähentää Euroopan unionin primäärienergiankulutusta 20 prosentilla ennusteisiin verrattuna, vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 20 prosentilla vuoden 1990 tasosta sekä lisätä uusiutuvien energiamuotojen osuutta primäärienergiantuotannossa 20 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Euroopan unionin tavoitteina on lisäksi vahvistaa EU-maiden riippumattomuutta tuodusta energiasta sekä pyrkiä hiilineutraaliin energiasysteemiin pidemmällä aikavälillä kuitenkin ottaen huomioon Euroopan taloudellinen kilpailukyky.

#### 2.1.1 Energiatehokkuusdirektiivi ja sen vaikutukset energiatuotantoon

Euroopan unioni antoi lokakuussa 2012 direktiivin energiatehokkuudesta (2012/27/EU), joka säättää vähimmäisvaatimukset jäsenvaltioille energiatehokkuuden huomioon ottamisesta lainsäädännössä ja mahdollisissa tukitoimissa. Direktiivi varmistaa EU-2020 -tavoitteisiin kuuluvan energiatehokkuustavoitteen saavuttamista ja luo yhteisen kehyksen energiatehokkuuden edistämistä koskeville toimenpiteille. Lisäksi direktiivin tavoitteena on varmistaa lisäparannuksien valmistelemisen myös 2020 vuoden määräajan

jälkeen. Energiatehokkuus parantaa EU:n energiansaannin varmuutta vähentämällä primäärienergian kulutusta ja energian tuontia. Lisäksi energiatehokkuus auttaa vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä kustannustehokkaasti sekä hillitsemään ilmastomuutosta. Direktiivi on tullut panna toimeen kansallisesti vuoden 2014 alkupuolella.

Energiatehokkuusdirektiivi säättää energiankäytön tehokkuudesta seuraavien osa-alueiden osalta: kansallisten energiatehokkuustavoitteiden asettamisesta ja toimintasuunnitelmien laatimisesta, uusien rakennusten energiatehokkuuden huomioon ottamisesta, julkisten rakennusten korjauksesta energiatehokkuuden parantamiseksi, energianloppukäyttäjien kulutuksen mittaamisesta ja älykkäiden mittarien käyttöönotosta, yritysten energiakatselmusten tekemisestä, energian jakelijoiden ja vähittäismyyjien 1,5 prosentin energiansäästövelvoitteesta ja kuluttajien tiedottamisesta. Lisäksi direktiivissä säädetään energian toimitusten tehokkuudesta, johon kuuluvat lämmityksen ja jäähdytyksen tehokkuuden edistäminen sekä energian muuntamisen, siirron ja jakelun energiatehokkuus. (EPNDir 2012/27/EU)

Direktiivin mukainen lämmityksen ja jäähdytyksen tehokkuuden edistäminen koskee tehokkaan sähkön ja lämmön yhteistuotannon sekä tehokkaan kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen hyödyntämismahdollisuuksien arviointia, politiikkojen ja toimien luomista, joilla rohkaistaan ottamaan huomioon yhteistuotannon hyödyntämismahdollisuudet ja kehitetään niitä paikallisella ja alueellisella tasolla. Suunniteltaessa uusia sähkön lauhdetuotantolaitoksia, joiden kokonaislämpöteho on yli 20MW, tai olemassa olevia laitoksia merkittävästi uudistettaessa tulee tehdä kustannus-hyötyanalyysi hukkalämmön hyötykäytöstä ottaen huomioon ilmasto-olosuhteet, taloudellinen toteutettavuus, kysyntä sekä tekninen soveltuvuus. Kustannus-hyötyanalyysi tehdään myös, kun suunnitellaan tai uudistetaan teollisuuslaitosta, joka tuottaa yli 20 MW kokonaislämpötehoa, tai kun suunnitellaan uutta kaukolämmitys- ja kaukojäähdytysverkkoa tai uutta energiantuotantolaitosta (yli 20 MW<sub>th</sub>) olemassa olevaan verkkoon läheisten teollisuuslaitosten hukkalämmön käyttämisen arvioimiseksi. Kustannus-hyötyanalyysin tekemisestä voidaan kuitenkin vapauttaa huippukuorma- ja varavoimalaitokset, joiden suunniteltu toiminta-aika on alle 1500 tuntia vuodessa, sekä ydinvoimalaitokset. Direktiivin mukaan yhteistuotannossa tuotetun sähkön siirto ja jakelu on varmistettava asettamalla yhteistuotantosähkö etusijalle tuotantolaitosten ajojärjestyksessä tai varmistamalla yhteistuotantosähkön verkkoon pääsy. Tehokkaalle yhteistuotantosähkölle on myös oltava alkuperätakuujärjestelmä. (EPNDir 2012/27/EU)

Tehokas sähkön ja lämmön yhteistuotanto on merkittävin yksittäinen energiatehokkuuden edistämistoimenpide, ja sen tavoitteena on ensisijaisesti säästää primäärienergiaa. Samalla yhteistuotanto on merkittävä tekijä EU:n kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Euroopan laajuisesti yhteistuotantoa sekä kaukolämmitystä ja -jäähdytystä ei ole juurikaan hyödynnetty, mitä annetulla direktiivillä halutaan muuttaa. (EPNDir 2012/27/EU)

Suomessa energiatehokkuustoiminta on jo laajaa eikä direktiivi tuonekaan suuria muutoksia. Suomen energiatehokkuustoiminnan keskiössä ovat vapaaehtoiset energiatehokkuussopimukset sekä energiakatselmuksien tekeminen. Teollisuus ja palvelut ovat jo suurelta

osin energiatehokkuussopimusten ja energiakatselmustoiminnan piirissä eturintamassa Euroopassa. Kansainvälinen energiajärjestö IEA onkin maatutkinnoissaan kiitellyt Suomen energiatehokkuustoimintaa osana hyvää energiapolitiikkaa. Kuitenkin nykyistä energiatehokkuustyötä on jatkettava ja kehitettävä edelleen. Nykyinen energiatehokkuusjärjestelmä tulee kuitenkin direktiivin puitteissa kuvata lainsäädäntöön, mitä ei ole tähän mennessä tehty. (Energiatehokkuusdirektiivin toimeenpano 2014)

Energiatehokkuusdirektiivi ja sen tuomat lainsäädännöt merkitsevät siis voimistuvaa kaukolämpö- ja -jäähdytysjärjestelmätrendiä Euroopassa. Direktiivi vaatii kattavan kansallisen arvioinnin kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotannosta ja hyödyntämismahdollisuuksista viiden vuoden välein vuodesta 2015 eteenpäin sekä lämmöntalteenoton hyödyn analysoinnin jokaisen lauhdevoimalan tai lämpöä tuottavan teollisuuslaitoksen suunnitteluvaiheessa.

### **2.1.2 Energiarakenteen kehityssuuntia vuoteen 2030 ja 2050**

Euroopan unionissa on tarkasteltu energiarakenteen kehityssuuntia ja asetettu tavoitteita energia- ja ilmastopolitiikalle nykyisten 20-20-20 –tavoitteiden ja energiatehokkuusdirektiivin lisäksi pitkällä tähtäimellä. Euroopan komissio antoi tammikuussa 2014 tiedonannon komissiolle, jossa määritellään energia- ja ilmastopolitiikan puitteet vuoteen 2030 asti. Lisäksi EU on selvittänyt etenemissuunnitelmaa siirtymisessä kilpailukykyiseen vähähiiliseen talouteen vuoteen 2050 mennessä sekä arvioinut siirtymisessä tarvittavia ratkaisuja Energian tiekartta 2050:n avulla.

Euroopan komission tiedonannossa parlamentille ja neuvostolle esitetään EU:n ilmasto- ja energiapoliittisiksi puitteiksi vuoteen 2030 edelleen uusiutuvien energiamuotojen osuuden lisäämistä 27 prosenttiin sekä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä 40 prosentilla vuoden 1990 tasosta. Muutoksia Eurooppa 2020 -strategian tavoitteisiin ovat muun muassa jäsenvaltioiden osalta sitovien uusiutuvien energiamuotojen tavoitteiden poistuminen sekä kasvihuonekaasupäästötavoitteiden jakaminen päästökaupan piirissä olevien ja siihen kuulumattomien alojen välille. Uusiutuvien energiamuotojen 27 prosentin tavoite on sitova yleistavoite EU:lle, mutta jäsenvaltioille ei aseteta sitovia tavoitteita kuten 20-20-20 -tavoitteissa. Puitteiden tavoitteina on lisätä EU:n sisämarkkinoiden yhtenäisyyttä ja kannustaa kustannustehokkaaseen siirtymiseen kestävämpään energiajärjestelmään, minkä vuoksi jäsenvaltioille ei EU:n taholta säädetä erillisiä tavoitetoimia. Päästöjen osalta tavoite jaetaan päästökauppajärjestelmään kuuluville aloille kohdistuvaksi 43 prosentin vähennystavoitteeksi sekä päästökaupan ulkopuoliseksi 30 prosentin vähennystavoitteeksi vuoden 2005 tasosta. EU:n 2030-tavoitteet hieman kiristyvät vuoden 2020 tavoitteista, mutta niitä on kritisoitu epä johdonmukaisiksi vähähiiliseen talouteen siirtymisen etenemissuunnitelman kanssa, jonka hiilidioksidipäästötavoite on paljon suurempi. Lisäksi kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteen on arveltu olevan riittämätön ilmastomuutoksen hillitsemisessä alle kahden asteen lämpenemiseen. Kuitenkin lopullinen päätös tehdään vuoden 2014 aikana Euroopan parlamentissa, jolloin nähdään mitä ilmasto- ja energiapoliittisia tavoitteita ja toimenpiteitä vuosille 2020–2030 asetetaan. (KOM(2014)15; Hassi 2014; Puoskari 2014)

Vuonna 2011 Euroopan komissio antoi etenemissuunnitelman kohti kilpailukykyistä vähähiilistä taloutta vuoteen 2050 mennessä. Etenemissuunnitelman päätavoite on hallitustenvälisen ilmastopaneeli IPCC:n ohjeistuksen mukaisesti vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vuoteen 2050 mennessä 80–95 % vuoden 1990 tasoon nähden. Etenemissuunnitelmassa esitellään ilmastotoimia ohjaavat keskeiset tekijät tavoitteiden saavuttamiseksi. Vähähiiliseen talouteen pyrittäessä hiiletön sähköntuotanto, päästökauppa, energiatehokkuus, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi sekä liikenteen ja maankäytön tehostamiset ovat avainasemassa. Suurimmat päästövähennykset allokoidaan sähköntuotantoon (93–97 %), asumiseen ja palveluihin (88–91 %) sekä teollisuuteen (83–87 %). Tavoitteiden saavuttaminen merkitsee paitsi investointeja myös riippuvuuden vähenemistä tuontien energiasta, ilmanlaadun paranemista sekä työpaikkojen lisääntymistä. (KOM(2011)112)

Euroopan unionin komission laatima Energian tiekartta 2050 (Energy Roadmap 2050) tarkastelee EU-maiden energiantuotannossa tarvittavia ratkaisuja ja skenaarioita matkalla kohti hiilineutraalia energiantuotantoa, katsoen EU-2020 -tavoitteita pidemmälle vuoteen 2050 asti. Tiekartan mukaan EU:n energijärjestelmät vaativat suuria investointeja riippumatta hiilineutraaliustavoitteista ja toisaalta energijärjestelmien modernisointi tuo investointeja eurooppalaiseen talouteen. Kolmanneksi tiekartta arvioi Euroopan hyötyvän vähähiiliseen energiasysteemiin siirtymisestä ollessaan edelläkävijänä energiapalvelujen ja -tuotteiden maailmanmarkkinoilla. Hiilineutraaliin energijärjestelmään siirtyminen vähentää riippuvuutta energiantuonnista sekä altistumista fossiilisten polttoaineiden epävakaille hinnoille. Lisäksi se vähentää ilmapäästöjä sekä tuo mukanaan terveydellisiä etuja. (Energy Roadmap 2012)

Euroopan energiapolitiikassa on havaittavissa muutosta ja muutoksen tarvetta monipuolisen energiakentän, varastoinnin ja rajoja ylittävien siirtoyhteyksien suuntaan. Ratkaisuksi ei haeta yhtä tai muutamaa energianlähdettä tai energiantuotantomuotoa vaan energianlähteiden monimuotoisuuden hyväksikäyttöä sekä yhteistyötä niin maiden kuin organisaatioidenkin rajojen yli. Enenevä uusiutuvien energiamuotojen hyödyntäminen sekä näiden kilpailukykyyn lisääntyminen myös tukitoimien vähentyessä muokkaavat tulevaisuuden energiantuotantorakennetta. Energiatehokkuuden lisääminen niin teollisuudessa, rakennuksissa kuin siirtoyhteyksissä sekä ihmisten huomion kiinnittäminen energiankulutuskäyttäytymiseen kotona, liikenteessä sekä ostopäätöksissä ovat avainasemassa energiankulutuksen vähentämisessä. Energiatehokkuuden lisäämiseen kuuluu myös sähköntuotannon jätelämmön hyödyntäminen ja täten yhteistuotannon enenevä käyttö, vaikka osaltaan rakennusten energiankulutuksen vähentyessä lämmön- tuotannonkin tarve vähenee. (Energy Roadmap 2012)

Kaasun arvellaan olevan energiatehokkuuden ja uusiutuvien energioiden ohella tärkeä osatekijä muutoksessa kohti vähähiilistä energiantuotantoa. Öljyn ja hiilen korvaaminen kaasulla olemassa olevilla teknologioilla helpottaa päästöjen vähentämistä lyhyellä ja keskipitkällä tähtäimellä. Pitkällä tähtäimellä kaasun käyttö lämmityksessä saattaa vähentyä energiatehokkuustoimenpiteiden ansiosta, mutta sen käyttö energiantuotannossa saattaa silti pysyä nykyisessä mittakaavassa tai lisääntyä. Myös muut fossii-



liset polttoaineet säilynevät jossain määrin energiaspektrissä, hiilidioksidin talteenoton laajamittaistuksessa hiiltä voitaisiin käyttää kestävän ja turvatun energian lähteenä. Öljyn käyttö todennäköisesti vähenee, mutta se jäänee ainakin osittain kaukokuljetusten polttoaineeksi. Ydinvoima ja sen turvallisuus on puhuttanut Euroopan energiapolitiikassa etenkin Fukushima onnettomuuden jälkeen. Jotkin valtiot pitävät riskejä liian suurina hyväksyttäviksi ja ovat aloittaneet toimia ydinenergian käytön lopettamiseksi. Kuitenkin nykyään suurin osa hiilidioksidipäästöttömästä energiasta EU:ssa tuotetaan nimenomaan ydinvoimalla, minkä vuoksi se todennäköisesti säilyy laajamittaisesti energiamarkkinassa myös tulevaisuudessa. (Energy Roadmap 2012)

## 2.2 Energiamarkkinat Euroopassa

Energiamarkkinat ovat monipuolistuneet Euroopassa ja yhä enenevässä määrin tuotanto hajautuu ja uusiutuviin energiamuotoihin panostetaan. Tarkastellaan Euroopan energiemarkkinoita muutaman erilaisen, suuren toimijan kautta.

Saksa on Euroopan energiapolitiikan edelläkävijä ja Saksan energiemarkkinat ovat monin tavoin erilaiset kuin muualla Euroopassa. Saksa on ottanut poliittisia ja konkreettisia askeleita saavuttaakseen Kioton sopimuksen tavoitteensa, EU:n 2020 energiasstrategian kansalliset tavoitteet sekä oman energiasstrategiansa tavoitteet vuodelta 2010. Viime vuosina käynnissä olleen energiapolitiikan muutoksen (saks. *Energiewende*) myötä Saksa on asettanut itselleen tavoitteen vähentää radikaalisti kasvihuonekaasupäästöjään pitkällä tähtäimellä, ensin 55 % vuoteen 2030 mennessä, 70 % vuoteen 2040 ja 80–95 % vuoteen 2050 mennessä. Saksan tavoitteena on lähinnä energiatehokkuutta lisäämällä vähentää primäärienergiankulutusta 20 prosentilla vuoden 2008 tasosta vuoteen 2020 mennessä sekä edelleen 2050 mennessä 50 %. Kolmantena päätavoitteenaan Saksa pyrkii nostamaan uusiutuvien energiamuotojen osuuden 30 prosenttiin energiankulutuksesta 2030 mennessä ja edelleen 60 %:iin vuoteen 2050. Kansainvälisen energiajärjestö IEA:n mukaan Saksa saavuttanee Kioton ilmastotavoitteensa, mutta muiden, kunnianhimoisten tavoitteiden saavuttamiseksi on tehtävä lisätoimenpiteitä. Saksan energiakäännös sisällytti lainsäädäntöön tukitoimia uusiutuville energiamuodoille, sähköverkon rakentamiselle ja energiatehokkuuden lisäämiselle sekä mahdollisuuden uudistusten rahoitukseen. Saksan energiapolitiikkaa leimaa lisäksi ydinvoiman käytön asteittainen lopettaminen vuoteen 2022 mennessä, mikä lisää muun energiantuotannon tarvetta. Saksassa oli 12,1 GW asennettua ydinvoimakapasiteettia vuonna 2012, jolla tuotettiin 108 TWh sähköä. Sähkön tuotannosta ydinvoiman osuus oli 18 %, mikä tulee vähitellen korvata muilla energianlähteillä. Vuonna 2011 suljettiin jo 8,4 GW ydinvoimaa, minkä sähköntarpeen Saksan lauhde- ja yhteistuotantolaitosten kapasiteetti pystyi vielä kattamaan, mutta lisäinvestointeja niin sähköverkkoon kuin sähköntuotantorakenteeseen tullaan tarvitsemaan. (Energiepolitik 2013)

Saksassa uusiutuvien energiamuotojen käyttö on kasvanut nopeasti viime vuosina, mihin on pitkälti syynä ollut näitä tukeva energiapolitiikka ja kansallinen sitoutuminen tavoitteisiin. Esimerkiksi tuulivoiman tuotantokapasiteetti Saksassa yli nelinkertainen

tui vuosien 2000–2010 välillä, samoin kaikkien uusiutuvien energiamuotojen käyttö kasvoi lähes nelinkertaiseksi. Kuitenkin fossiiliset polttoaineet ovat edelleen vahvassa asemassa Saksan energiakentässä, sillä niillä tuotetaan lähes 80 % primäärienergiasta ydinvoiman osuuden ollessa vielä noin 10 %. Saksan liittovaltio myös tukee uusiutuvaa energiantuotantoa sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. (Energy, transport 2012; Energiahaasteet 2013; Energiepolitik 2013)

Italian energiamarkkinat ovat pitkälti fossiilisten polttoaineiden tuonnin sekä sähköntuonnin varassa, energiaomavaraisuusaste on Italiassa vain 19 %. Öljyllä ja maakaasulla tuotetaan 77 % Italian primäärienergiasta, ydinvoimaa Italiassa ei ole ollenkaan. Uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetaan 12 % primäärienergiasta ja 28 % sähköstä (2011), Italian tavoitteena on nostaa tuotanto 20 %:iin primäärienergiasta ja 35–38 %:iin sähköntuotannosta. Uusiutuvien energiamuotojen käyttö lisää myös energiaomavaraisuutta, mitä Italian energiapolitiikalla halutaankin parantaa. Energiatehokkuutta on parannettu valkoisten sertifikaattien järjestelmällä sekä kotitalouksien verovähennyksillä. Sähkön- ja kaasunjakelijoilta vaaditaan energiansäästöjä, joista saa valkoisia sertifikaatteja, yhden sertifikaatin jokaista öljykvivalenttitonin säästöä vastaan. Ensimmäisten 5 vuoden aikana järjestelmän avulla raportoitiin 27 GWh energiansäästöistä. (Energy Policies 2009; Renewable energy 2013; Energy Policy 2013)

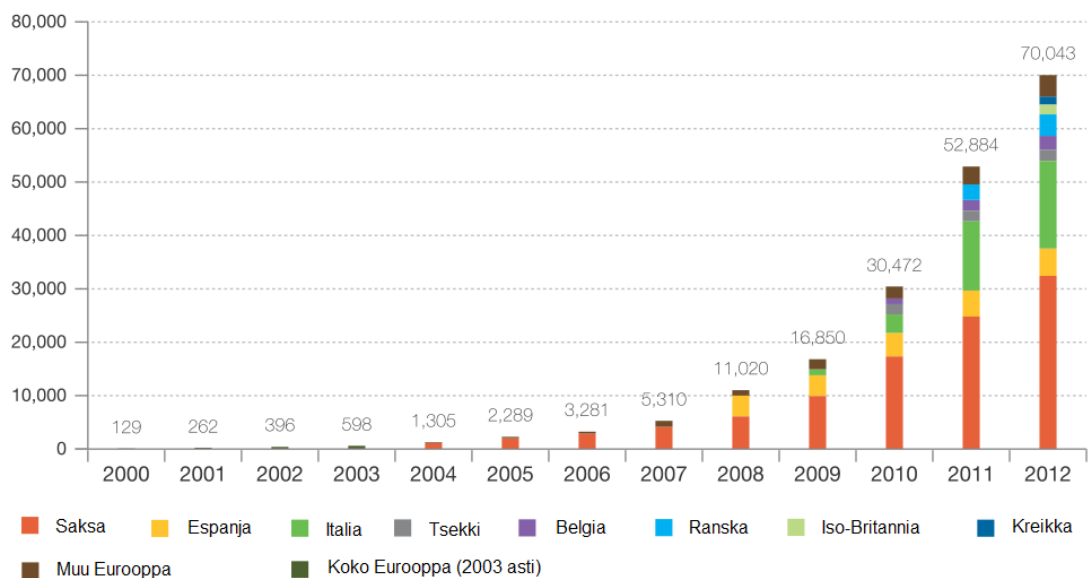
### 2.2.1 Uusiutuvat energiamuodot

Uusiutuvien energiamuotojen käyttö on kasvanut Euroopassa, vaihdellen kuitenkin maittain niin määrien kuin tuotantomuotojenkin suhteen. Uusiutuvista energiamuodoista tuuli- ja aurinkosähkö ovat luonteeltaan ajoittaisia ja siksi vaikuttavat suurina osuuksina energiantuotantorakenteeseen myös välillisesti vaatien säätö- ja varavoimaa.

Nykyisin Saksassa tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla 11 % primäärienergiantuotannosta, sähköntuotannosta osuus on 22 %, vastaavat luvut Italiassa ovat 12 % ja 28 % (2011). Saksassa tuotetaan valtaosa Euroopan tuulivoimasta, vaikka sen tuuliolosuhteet eivät ole poikkeuksellisen hyvät. Asennettu tuulivoimakapasiteetti vuonna 2010 oli 27 GW, kun se vielä vuonna 2000 oli 6 GW, tuulivoiman tuotantokapasiteetti kasvoi 2000-luvun ensimmäisellä vuosikymmenellä siis melkein 4,5-kertaiseksi. Saksaan asennettu tuulivoimakapasiteetti vastaa kolmasosaa koko Euroopan unionin alueelle rakennetusta tuulivoimasta. Saksassa on täten eniten asennettua tuulivoimakapasiteettia EU:ssa. Saksassa tuulivoimalla tuotettiin noin 8 % sähköntuotannosta vuonna 2012. Espanja on Saksan jälkeen Euroopan toiseksi suurin tuulivoiman tuottajamaa, sillä on asennettua tuulivoimakapasiteettia 23 GW. Italiassa asennettua kapasiteettia on n. 8,6 GW (2013), jolla tuotetaan 4 % maan sähköntarpeesta. Italiassa tuulivoiman tuelle on kuitenkin asetettu matalahko katto vuodesta 2013 eteenpäin, mikä vähentänee lisätuulivoiman rakennuksia verrattuna aiempiin vuosiin, jolloin tuulivoiman tuet olivat suotuisemmat. (Energiepolitik 2013; IEA Wind 2013)

Aurinkoenergiantuotannossa Saksa on ollut maailmanlaajuisesti yksi johtavista valtioista. Aurinkosähkön kasvu koko 2000-luvun on ollut huimaa. Saksassa asennettua aurinkosähkökapasiteettia oli vuonna 2012 32 GW, josta 7,6 GW eli yli viidesosa asen-

nettiin kyseisenä vuonna. Lisäksi Saksassa on yli 11 GW asennettua aurinkolämpökapasiteettia. Aurinkosähköllä tuotettiin noin 4–5 % sähköntuotannosta Saksassa v. 2012. Saksan lisäksi erityisesti Italiassa on panostettu aurinkosähköön. Italiassa asennettua aurinkosähkökapasiteettia on 16 GW (2012). Uusien aurinkokennojen rakentaminen on Italiassa kuitenkin hiipunut vuoden 2011 innostuksen jälkeen syöttötariffien vähenemisen myötä. Kuvassa 2.1 on esitetty Euroopan kumulatiivinen aurinkokennojen kapasiteetti vuosina 2000–2012, mistä voidaan havaita kapasiteetiltaan suurimmat aurinkosähkömaat Saksa, Italia, Espanja (5 GW) ja Ranska (4 GW). (Energy, transport 2012; Energiepolitik 2013; Korpela 2013; Solaranlagen-Portal 2014)



**Kuva 2.1** Euroopan kumulatiivinen aurinkosähkökapasiteetti (MW) maittain vuosina 2000–2012. Muokattu lähteestä (Masson et al. 2013).

Tuulivoiman ja aurinkoenergian suuri, ja koko ajan voimakkaasti kasvava, osuus sähköntuotannossa vaikuttavat perus- ja säätövoiman tarpeeseen. Tuuli- ja aurinkoenergian tuotanto on vaihtelevaa, niin hetkellisesti kuin vuorokauden ja vuodenajan mukaan. Heilahteleavan tuotannon tasapainottamiseksi sähköntuotannossa vaaditaan nopeasti reagoivia sähköntuotantolaitoksia. Sekä Saksassa että Italiassa on vanha sähköverkko, joita ei ole suunniteltu kestäämään suuria tuotantovaihteluita eikä siten heilahtelevaa sähköntuotantoa. Heilahtelun tasoittamiseksi tarvitaan paikallisesti säätövoimaa, hajautettua sähköntuotantoa, joka vähentää verkon kuormitusta. Tällaisia säätösähkölaitoksia ovat perinteisesti olleet nopeasti ylösajettavat kaasuturbiinilaitokset sekä dieselvoimalaitokset. Myös investoinnit sähköverkkoon, kuten siirtolinjojen ja muuntamoiden parantaminen, vahvistavat verkon heilahteleavan tuotannon vastaanottokykyä (Vanhanen 2014). Suuri tuuli- ja aurinkoenergian osuus sähköntuotannossa vaikuttavat siis sekä välillisesti että suoraan myös maakaasu- sekä voimalaitosmarkkinoihin.

### 2.2.2 Uusiutuvien energiamuotojen tuet

Euroopassa on käytössä erilaisia tuki- ja kannustintoimia uusiutuvien energiamuotojen investoinneille ja sähköntuotannolle, joilla pyritään vähentämään rahoituksen esteitä sekä lisäämään uusiutuvien energiamuotojen kannattavuutta. Järjestelmät vaihtelevat maittain ja ovatkin hyvin monisyisiä. Käytössä on muun muassa investointitukia, verohelpotuksia, hintapreemioita, vihreitä sertifikaatteja sekä syöttötariffeja, jotka takaavat tuotetusta uusiutuvasta sähköstä takuuhinnan. Esimerkiksi Saksassa on käytössä syöttötariffeja niin tuulienergialla, aurinkovoimalla, vesivoimalla, biomassalla ja -kaasulla kuin geotermisellä energiallakin tuotetulle sähkölle vaihdellen laitoksen energianlähteen, kapasiteetin ja käyttöönottovuoden mukaan. Taulukosta 2.2 nähdään EU-maissa käytössä olevat tukijärjestelmät. Tukien määrät, voimassaoloajat ja myöntämisperusteet vaihtelevat maittain, eikä niiden tarkempi tutkiminen kuulu tämän työn alueeseen. (Held et al. 2010; Marja-aho 2011)

**Taulukko 2.2** Uusiutuvilla energiamuodoilla tuotettujen sähkön ja lämmön keskeisimmät tukijärjestelmät Euroopan Unionissa maittain. Tiedot lähteestä (Marja-aho 2011).

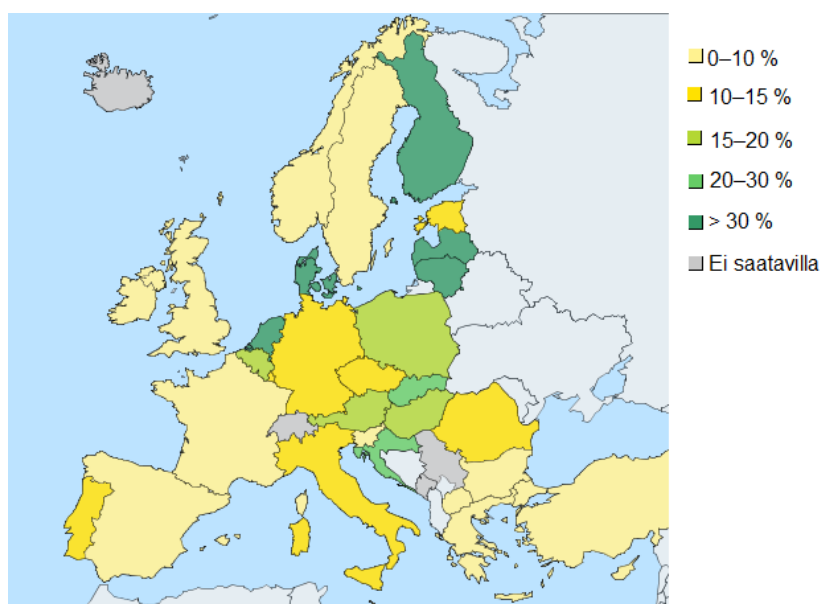
	AT	BE	BG	CY	CZ	DE	DK	EE	ES	FI	FR	GR	HU	IE
Syöttötariffi	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
Preemio					x		x	x	x	x				
Vihreä sertifikaatti		x												
Investointituki	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Verotuki		x			x	x	x		x		x	x		x
	IT	LT	LU	LV	MT	NL	PL	PT	RO	SE	SI	SK	UK	
Syöttötariffi	x	x	x	x		x		x			x		x	
Preemio		x									x	x		
Vihreä sertifikaatti							x		x	x			x	
Investointituki	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Verotuki	x						x			x			x	

Uusiutuvien energiamuotojen tuet ja syöttötariffit vaikuttavat suoraan uusien laitosten investointeihin ja kapasiteetin kasvuun kansallisella tasolla. Täten vähenevät tuet, kuten Espanjassa aurinkosähkön ja Italiassa sekä aurinko- että tuulisähkön vähentyneet tariffit tai tariffikatot, lisäävät rahoittajien tai tuottajien riskejä ja siten vähentävät uusia investointeja. Välillisesti uusiutuvien energiamuotojen tuet ja niiden muutokset vaikuttavat siis koko energiantuotantorakenteeseen ja säätövoiman tarpeeseen. Toisaalta lisääntyneet aurinko- ja tuulivoimalat ovat painaneet investointikustannuksia alas ja pitkällä tähtäimellä pyritäänkin ilman tukia kannattavaan uusiutuvien energiamuotojen käyttöön.

## 2.3 Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto Euroopassa

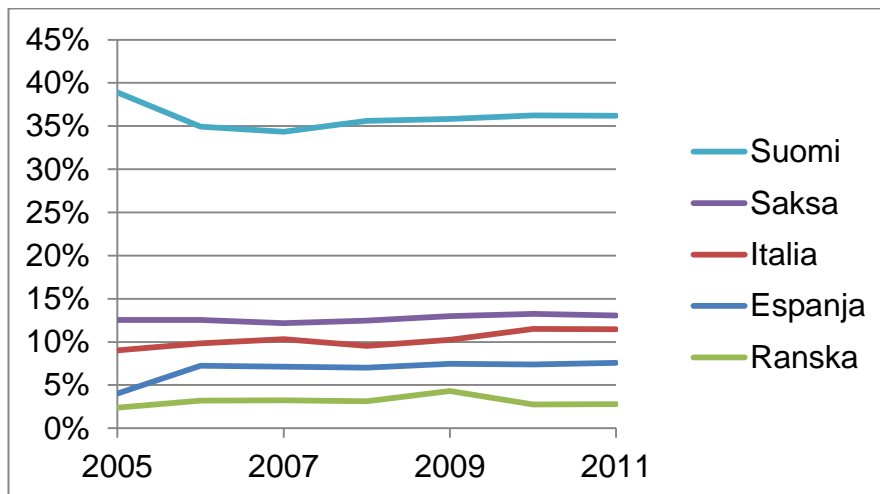
Sähkön ja lämmön yhteistuotanto tarkoittaa nimensä mukaisesti sekä sähkö- että lämpöenergian tuottamista samassa laitoksessa samasta polttoaineesta. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto on energiatehokas tuotantomuoto, jota käytetään Euroopassa etenkin Pohjoismaissa, entisen Neuvostoliiton alueella sekä Saksassa näiden talvisen lämmöntarpeen takia. EU pyrkii lisäämään yhteistuotannolla tuotettujen sähkön ja lämmön määrää primäärienergian säästämiseksi ja sitä kautta energiatehokkuuden parantamiseksi ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Yhdistetyllä sähkön- ja lämmöntuotannolla primäärienergiaa säästyy 20–30 % verrattuna erillistuotettuun sähköön ja lämpöön. EU:n niin kutsuttu CHP-direktiivi vuodelta 2008, joka sittemmin yhdistettiin energiatehokkuusdirektiiviin, edistää yhteistuotannon lisäämistä jäsenmaissa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannosta käytetään englanniksi nimityksiä ”combined heat and power” eli CHP ja ”cogeneration”. (European Summary 2010)

Nykyään Euroopassa tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotannolla noin 11 % sähköstä, Suomessa osuus on huomattavasti keskimääräistä suurempi, 36 % sähköntuotannosta. Toisaalta Suomessa jopa 80 % lämmöntuotannosta tapahtuu yhteistuotantolaitoksissa. Euroopassa määrällisesti eniten yhteistuotantosähköä tuotetaan Saksassa, jossa tuotetaan yli 20 % kaikesta Euroopassa yhteistuotannossa tuotetusta sähköstä. Saksassa yhteistuotannolla tuotetun sähkön osuus on kuitenkin vain 13 % kaikesta maan sähkön- tuotannosta. Esimerkiksi Ranskassa vain 3 % sähköstä tuotetaan yhteistuotannolla. Euroopassa suhteellisesti eniten yhteistuotantosähköä tuotetaan Latviassa (48 %), Tanskassa (46 %), Suomessa (36 %) ja Alankomaissa (33 %). Vähiten yhteistuotantoa (alle 7 %) käytetään Euroopan saarivaltioissa sekä Norjassa, Ranskassa, Kreikassa ja Bulgariassa. Kartta (kuva 2.3) havainnollistaa Euroopan yhteistuotantotilannetta maittain. (Combined Heat 2013; European Cogeneration 2013)



**Kuva 2.3** Yhteistuotantosähkön osuus tuotetusta sähköstä Euroopan Unionissa maittain. Muokattu lähteestä (Eurostat Tables 2014).

Yhteistuotannon osuus Euroopan energiantuotannossa on ollut suhteellisen ta-  
saista viime vuosina. Kuvassa 2.4 on esitetty Suomen, Saksan, Italian, Espanjan sekä  
Ranskan yhteistuotantosähkön osuus maan sähköntuotannosta vuosina 2005–2011, ja  
siitä havaitaan, että osuudet ovat pysyneet tasaisina eikä kasvua ole tapahtunut. Energia-  
tehokkuusdirektiivin toimeenpanon myötä yhteistuotannon sekä kaukolämmitys- ja -  
jäähdytysjärjestelmien voidaan odottaa yleistyvän varsinkin niissä maissa, joissa ne ei-  
vät vielä ole vahvassa asemassa.



**Kuva 2.4** Yhteistuotannolla tuotetun sähkön osuus maan sähköntuotannosta vuosina 2005–2011 viidessä EU-maassa. Tiedot lähteestä (Combined Heat 2013).

Taulukossa 2.5 on vertailtu yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotantoa samoissa  
viidessä EU-maassa vuonna 2011. Maat ovat sähköntuotantoprofiileiltaan ja yhteistuo-  
tannoltaan hyvin erilaisia. Havaitaan, että Saksassa tuotantomäärät ovat huomattavasti  
korkeammat kuin muissa vertailun maissa, vaikka yhteistuotannon osuus on lähellä Eu-  
roopan keskiarvoa. Ranskassa tuotetaan sähköä vain vähän yhteistuotannolla ja Suo-  
messä taas yhteistuotannon osuus on Euroopan ja maailman korkeimpia.

**Taulukko 2.5** Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto valikoiduissa Euroopan maissa vuonna 2011. Tiedot lähteestä (Combined Heat 2013).

	Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto			Käytetyt polttoaineet (%)				
	sähkön- tuotannon osuus (%)	sähkön- tuotanto (TWh)	lämmön- tuotanto (PJ)	kiinteät uusiutu- mattomat ja turve	öljy	maa- kaasu	uusiut- tavat	muut poltto- aineet
Espanja	8 %	22,1	159,0	2 %	7 %	77 %	0 %	14 %
Italia	11 %	34,7	202,5	1 %	17 %	70 %	4 %	8 %
Ranska	3 %	15,7	173,9	6 %	3 %	57 %	23 %	12 %
Saksa	13 %	79,6	638,9	27 %	4 %	50 %	10 %	9 %
Suomi	36 %	26,6	255,0	24 %	2 %	21 %	50 %	3 %

Yhteistuotantolaitoksissa käytetyt polttoaineet ovat edelleen suurelta osin fossiilisia polttoaineita, pääasiassa maakaasua, hiiltä ja öljyä. Maakaasu on suurin yksittäinen yhteistuotantolaitosten polttoaine, Euroopan mittakaavassa sillä katetaan 48 % yhteistuotannosta. Suomessa lähinnä metsäteollisuuden sivutuotevirroista ja muista biomassoista koostuvat uusiutuvat energianlähteet kattavat puolet yhteistuotannon polttoaineesta, muissa maissa uusiutuvien osuus on pienempi. Saksassa ja Suomessa huomattavan suuret osuudet yhteistuotannosta tuotetaan edelleen hiilellä. (Combined Heat 2013)

### 2.3.1 Yhteistuotannon tuet Euroopassa

EU-maissa tuetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantoa niin biomassasta kuin fossiilista polttoaineistakin tuotettuna. EU-direktiivien lähtökohtana on tukea tehokasta yhteistuotantoa, joka on määritelty siten, että sillä saavutetaan vähintään 10 % primäärienergian säästöt vastaavan lämmön ja sähkön erillistuotantoon nähden. Tukijärjestelmät vaihtelevat maittain ja ne sisältävät – kuten uusiutuvien energiamuotojenkin tuet – syöttötariffi- ja sertifikaattijärjestelmiä, investointi- ja verotukia sekä muunlaisia tukia ja näiden yhdistelmiä. Alla esitettyyn taulukkoon on koottu kaikissa EU-maissa käytössä olevat tukijärjestelmät fossiililla polttoaineilla toimivalle yhteistuotannolle. Mahdollinen bioenergiatuki on sisällytetty taulukon kohtaan Muu tuki. Muilla uusiutuvilla energialähteillä toimivat yhteistuotantolaitokset saattavat hyötyä uusiutuvien energiamuotojen tuista.

**Taulukko 2.6** EU-maissa käytössä olevat yhteistuotannon tukimuodot. Tiedot lähteestä (European Summary 2010).

	AT	BE	BG	CY	CZ	DE	DK	EE	ES	FI	FR	GR	HU	IE
Syöttötariffi	x		x		x	x			x		x	x	x	
Sertifikaatti		x												
Investointituki										x				x
Verotuki		x							x			x		x
Muu tuki*	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
	IT	LT	LU	LV	MT	NL	PL	PT	RO	SE	SI	SK	UK	
Syöttötariffi	x	x		x		x			x		x	x	x	
Sertifikaatti							x							
Investointituki	x					x		x	x	x			x	
Verotuki	x		x		x	x							x	
Muu tuki*		x	x	x	x	x		x		x	x			

\* Muu tuki sisältää erityyppisiä, monimutkaisia tukijärjestelmiä, joiden CODE (Cogeneration Observatory and Dissemination Europe) ei katso olevan erityisen houkuttelevia CHP-sektorille. Lisäksi muu tuki sisältää bioenergiatuen.

Esimerkiksi Saksa tukee sähkön ja lämmön yhteistuotannon lisäksi myös lämmitys- ja jäähdytysverkkoja sekä lämpö- tai kylmävarastoja pienessä ja suuressa mittakaavassa. Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksille esimerkiksi myönnetään hyvitystä

tuotetusta sähköstä laitoksen koon mukaan, pienille laitoksille valinnan mukaan joko tasaisesti 10 ensimmäisen käyttövuoden aikana tai kertamaksuna 30 000 tunnin tuotannosta, ja yli 50 kW laitoksille tukea maksetaan ensimmäisille 30 000 tuotantotunnille. Järjestelmällä pyritään kannustamaan muun muassa asuinalueille sopivia pienehköjä sähkön ja lämmön tuotantolaitoksia (saks. Blockheizkraftwerk, BHKW), mutta tukea saaville laitoskooille ei ole ylärajaa. Myös yhteistuotantolaitosten modernisoinnit voivat saada tukea. Italiassa yhteistuotantosähkölle maksetaan syöttötariffia, minkä lisäksi kaasupolttoaineista saa verovähennystä. Pienimmät yhteistuotantolaitokset saavat hyvitystä hajautetun tuotannon tuomista eduista sähköverkolle. Espanjassa yhteistuotantoa tuetaan polttoaineveron vähennyksinä sekä syöttötariffina, joka vähenee laitokseen kasvaessa. Pohjoismaissa fossiililla polttoaineilla toimivaa yhteistuotantoa ei tueta, mutta Suomessa ja Ruotsissa biomassoilla toimivat laitokset saavat investointitukea. (European Summary 2010; Kraft-Wärme-Kopplung 2013)

Polttoaineiden sekä sähkön ja lämmön hinnat vaikuttavat laitosten kannattavuuteen, ja tukijärjestelmät näyttäisivät toimivan parhaiten silloin, kun ne pienentävät investointiriskejä tai lyhentävät arvioitua takaisinmaksuaikaa, ja niiden vaikutukset pitkällä tähtäimellä pystytään ennakoimaan. Tukijärjestelmien lisäksi muut lainsäädännölliset järjestelmät voivat joko edesauttaa tai heikentää uusien yhteistuotantolaitosten rakentamista. Samoin sähkömarkkinoiden vapautuminen, byrokratia ja poliittisen ympäristön ailahtelevaisuus vaikuttavat osaltaan uusien yhteistuotantolaitosten investointihalukkuuteen. (European Summary 2010)

Tukien ja tariffien lisäksi myös muunlaiset järjestelmät voivat edesauttaa investointeja uusiin yhteistuotantolaitoksiin. Yksi tällainen järjestelmä on sähkön ostosopimus (engl. power purchase agreement, PPA), jossa ostaja sitoutuu vastaanottamaan tuotettua sähköä yleensä 15–25 vuoden ajan ja maksamaan siitä sovitun hinnan. Samoin myyjä sitoutuu tuottamaan sähköä kyseiselle ostajalle sovittuun hintaan. Näin sähkön ostosopimus takaa pitkäaikaiset myyntitulot myyjälle, yleensä sähkön tuottajalle tai tuotantolaitoksen omistajalle, jolloin investointiin tarvittava rahoitus on yleensä helpompi järjestää. Kyseinen ostosopimusjärjestelmä ei aina kuitenkaan sellaisenaan sovellu vapaille sähkömarkkinoille, jossa sähkön ostosopimus yleensä tehdään jo olemassa olevan sähkön tuotantolaitoksen ja ostajan välillä. EU onkin antanut sanktioita Puolan ja Unkarin sähkömarkkinoita vääristävään PPA-sopimusten käyttöön valtion omistaman sähköverkkoyhtiön ja sähköntuotantolaitosten välillä. (Competition in Energy 2014; Power Purchase Agreements 2014)

### **2.3.2 Yhteistuotantosähkön ja -lämmön tekniikat ja käyttökohteet**

Sähkön ja lämmön yhteistuotanto voidaan toteuttaa monella eri tekniikalla, joilla polttoaineen kemiallinen energia muunnetaan sähköksi ja lämmöksi. Yhteistuotantolaitokset voivat olla muun muassa kiinteillä, nestemäisillä ja kaasumaisilla polttoaineilla toimivia kattilalaitoksia, maakaasulla toimivia kaasuturbiinilaitoksia ja neste- ja kaasupolttoaineilla polttomoottoreihin perustuvia laitoksia. Pienen kokoluokan yhteistuotannossa



energianmuuntokoneena käytetään myös polttokennoihin ja Stirling-moottoreihin perustuvia tekniikoita.

Polttoon perustuvassa sähkön ja lämmön yhteistuotannossa polttoaineen kemiallinen energia vapautuu ensin lämpöenergiaksi tulipesässä, polttokammiossa tai moottorin sylinterissä. Lämpöenergia muunnetaan mekaaniseksi energiaksi Rankine-höyrykierron ja höyryturbiinin, Brayton-kaasukiertoprosessin ja kaasuturbiinin tai moottorin männän liikkeen avulla Diesel-, Otto- tai Stirling-kiertoprosesseissa. Mekaaninen energia muunnetaan generaattorin avulla sähköenergiaksi. Polttokennoissa polttoaineen kemiallinen energia muunnetaan suoraan sähköenergiaksi. Kaikkea polttoaineen sisältämää energiaa ei saada muutettua sähköksi, vaan osa siirtyy häviöinä ympäristöön ja osa voidaan ottaa lämpönä talteen ja hyödyntää lämmönkäyttökohteessa. Polttomoottorivoimaa sekä lämmöntalteenottoa tarkastellaan myöhemmissä luvuissa tarkemmin. (Kallio 2012)

Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksen käyttökohteet ja kokoluokat vaihtelevat yksittäisen kotitalouden energiantarpeen täyttämisestä aina satojen megawattien voimalaitos- ja kaukolämpöjärjestelmiin. Suuren kokoluokan yhteistuotantolaitokset tuottavat yleensä sähköä valtakunnanverkkoon ja lämpöä joko teollisuuden prosesseihin tai kaukolämpöverkkoon. Esimerkiksi Suomessa sähkön ja lämmön yhteistuotanto on rakentunut pääasiassa suuren kokoluokan laitosten varaan. Pienen kokoluokan yhteistuotantolaitoksilla voidaan kattaa esimerkiksi asuinalueen, liikelaitoksen tai kasvihuoneen lämmöntarpeet, mikä onkin yleistä Keski-Euroopassa, esimerkiksi Saksassa ja Alankomaissa. Jopa yksittäisen asuintalon tai maatilan sähkön ja lämmöntuotanto voidaan kattaa mikro-CHP-tuotantolaitoksella.

Sähkön ja lämmön yhteistuotantoon voidaan liittää myös jäähdytyksen tuotanto. Tällöin puhutaan yhdistetystä sähkön-, lämmön- ja jäähdytyksen tuotannosta, josta käytetään englanniksi termejä ”combined cooling, heat and power” eli CCHP ja ”trigeneration”. Sähkön ja kuuman veden tai höyryn lisäksi laitoksessa tuotetaan jäähdytettyä vettä kompression avulla sähköstä tai mekaanisesta energiasta tai absorptiojäähdytyksen avulla lämpöenergiasta. Niin kutsutun kolmoistuotannon käytöllä voidaan säästää jopa 50 % primäärienergiasta verrattuna sähkön, lämmön ja jäähdytyksen erillistuotantoon. Jäähdytettyä vettä voidaan käyttää esimerkiksi liike- ja toimistorakennusten jäähdytykseen tai kesällä kotien viilentämiseen kaukojäähdytyksenä. Kaukojäähdytyksen etuna on olemassa olevan kaukolämpöverkon hyödyntäminen kesäaikaan, kun kaukolämmön käyttöaste on pieni. Kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen yhdistäminen sähkön ja lämmön yhteistuotantoon sekä lämmön ja kylmän varastointiin mahdollistavat entistä kokonaisvaltaisemman energiajärjestelmän suunnittelun.

Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset voivat toimia niin peruskuormalaitoksina kuin huippukuorma- tai varavoimalaitoksinaakin. Perinteisesti yhteistuotantolaitoksia ajetaan lämmöntarpeen mukaan. Huippukuormalaitoksina käytetään sähköntarpeeseen reagoivia, nopeasti ylösajettavia laitoksia kuten polttomoottori- tai kaasuturbiinilaitoksia.

### 2.3.3 Joustavuus energiantuotannossa

Suuri uusiutuvien energiamuotojen osuus sähköntuotannossa sekä hajautettu energiantuotantorakenne vaativat monenlaisia muutoksia energijärjestelmään. Muun muassa Saksassa on arvioitu, että suuri ja edelleen kasvava aurinko- ja tuulisähkön osuus tarvitsevat ajoittaisen tuotantonsa tasapainottamista joustavien sähköntuotantolaitosten, sähkön- ja lämmön varastoinnin sekä sähkön kulutuksen tasoittamisen avulla. Vaikka aurinkosähköä yleisesti kulutetaan lähellä tuotantopistettään, tulee sitä pystyä ajoittain myös varastoimaan. Varastointiteknologioita on useita, jotka perustuvat perinteisen sähköenergian akkuvarastoinnin ohella energian muuntoon. Sähköä varastoidaan pumppuvoimaloiden avulla, jossa vettä nostetaan sähkön ylituotannon aikaan korkeammalle varastoon ja juoksetetaan sitä turbiinien läpi, kun sähkön kysyntä kasvaa. Sähkön avulla voidaan myös muuntaa hiilidioksidia ja vedestä erotettua vetyä metaaniksi, jota voidaan myöhemmin käyttää kaasuvoimaloissa sekä liikenteen polttoaineena. Konseptia kutsutaan ”power to gas” -menetelmäksi, ja se on jo käytössä muun muassa Saksassa. Lisäksi muiden, helpommin varastoitavien uusiutuvien energiamuotojen, kuten vesivoiman tuotantoa tulee ajoittaa aurinko- ja tuulisähkön tuotannon mukaan. Samoin sähkönkulutusta tulee tasoittaa sekä ajoittaa saatavilla olevan aurinko- ja tuulisähkön tuotannon mukaan. Ajoittainen tuotanto sekä sähkön siirtyminen kahteen suuntaan, kun sähkön kuluttajat ovat samalla tuottajia, asettavat vaatimuksia sähköverkolle. Siirtoverkko-yhteisiltä niin naapurimaiden kanssa kuin maiden sisälläkin vaaditaan entistä enemmän. (Vanhanen 2014, Wirth 2014)

Energiantuotannon tasapainottamiseksi tarvitaan myös lisää eri kokoluokkien sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksia, jotka pystyvät mukautumaan sähkön- ja lämmöntuotantotarpeisiin nopeasti, mutta myös tarpeen vaatiessa varastoimaan niin sähkön kuin lämmönkin ylituotantoa lämmöksi esimerkiksi lämpövarastojen, lämpöpumppujen ja kuumennustankojen avulla. Joustavilta tuotantolaitoksilta vaaditaan entistä enemmän joustokykyä niin kuorman, polttoaineen kuin rakennusasteenkin suhteen. Hajautetun tuotannon ja ajoittaisten vaihteluiden myötä yhteistuotantolaitosten tulee entistä paremmin pystyä vastaamaan erikseen sähkön ja lämmön kysyntään, toisin kuin perinteisesti, jolloin sähköä on tuotettu lämmönkysynnän mukaan sivutuotteena. Joustavien yhteistuotantolaitoksien tulee siis pystyä tuottamaan ajoittain myös vain sähköä tai lämpöä, mikä voidaan toteuttaa esimerkiksi suurten lämpövarastojen ja lisäpolttimien avulla. Kuvassa 2.7 on esitetty mahdollisen joustavan energiantuotantolaitoksen periaatekuva. Laitoksessa pääasiallisena voimantuottajana on polttomoottori, joka tuottaa sähköä ja lämpöä. Lisäksi laitos on varustettu erillisillä poltinkattilalla ja sähkövastuksilla sekä lämpövarastolla, joilla voidaan tuottaa kuumaa vettä riippumatta moottorin käytöstä. Laitos voi tuottaa jäähdytystä sekä moottorin jätelämmöstä tai kattilan tuottamasta lämmöstä että suoraan sähköllä. Näin laitosta voidaan ajaa sähkön-, lämmön- tai jäähdytyskuorman mukaan joustavasti. Yhteistuotantolaitosten monipuolisuutta voidaan hyödyntää kolmoistuotannossa, jossa parhaiten voidaan ottaa lämmöntuotanto ja kaukolämpöverkko hyötykäyttöön myös lämpimien kesäkuukausien aikana. Hajautetun tuotannon



### 2.4.1 Maakaasu polttoaineena

Maakaasu on luonnonkaasua, joka koostuu pääasiassa metaanista. Maakaasun koostumus vaihtelee alkuperän mukaan, ja se sisältää metaanin ohella muita hiilivetyjä, inerttejä kaasuja sekä mahdollisesti myös haitallisia aineita kuten rikkipitoisia kaasuja. Venäläinen maakaasu sisältää pääosin, yli 98 %, metaania, kun esimerkiksi saksalainen maakaasu on 88-prosenttisesti metaania, sisältäen 10 % typpeä. Maakaasukoostumuksissa etenkin etaanin ja typen osuudet voivat olla merkittäviä ja vaihtelevat kentän mukaan. (Moilanen et al. 2002)

Maakaasun sanotaan olevan ympäristöystävällinen fossiilinen polttoaine. Maakaasun polttamisesta syntyy vähemmän päästöjä kuin muiden fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Rikkidioksidipäästöjä ei maakaasun käytöstä synny käytännössä ollenkaan. Myös syntyvien hiilidioksidin ja typenoksidien määrät ovat vähäisemmät verrattuna muihin fossiilisiin polttoaineisiin. Metaanin hiilivetykoostumuksesta johtuen maakaasun polton hiilidioksidipäästöt ovat 25–30 % pienemmät kuin öljyllä ja 40–50 % pienemmät kuin hiilellä. Myös hiukkas- ja raskasmetallipäästöt sekä tuhkanmuodostus on olematonta polttoaineen kaasumaisen olomuodon ansiosta. (Eurogas 2014)

Jotta maakaasua voidaan käyttää moottorivoimalan polttoaineena, sen täytyy täyttää tietyt puhtaus- ja lämpöarvokriteerit. Seuraavaan taulukkoon on kirjattu Wärtsilän SG-moottorityypin vaatimat maakaasukriteerit.

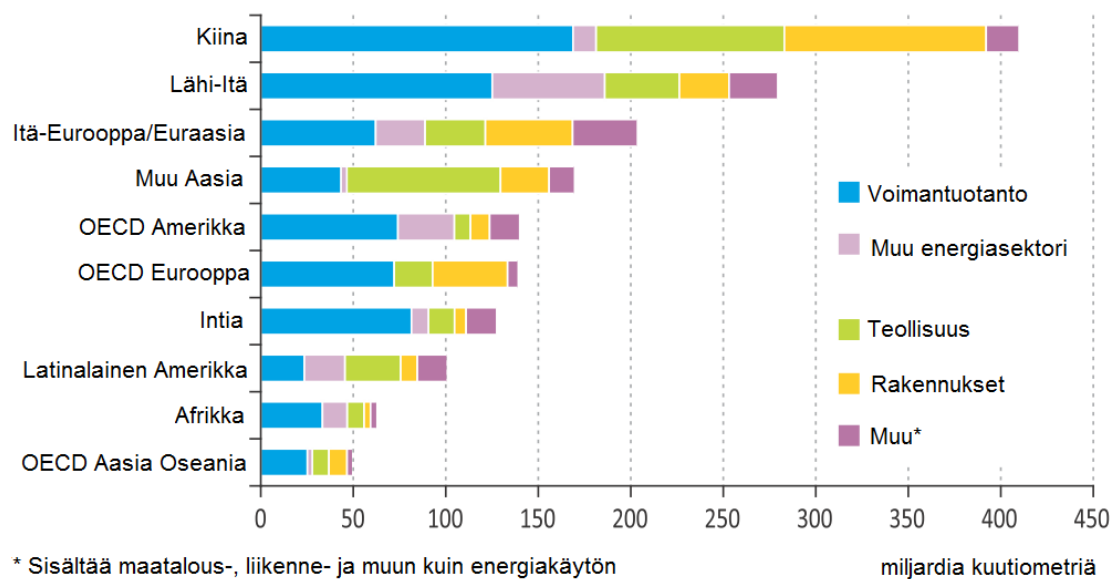
**Taulukko 2.8** Maakaasun laatuksikriteerit kaasumoottorin sisäänmenossa. Tiedot lähteestä (Wärtsilä Power Plant 2012).

Ominaisuus	Raja-arvo	
Alempi lämpöarvo	min. 28	MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Metaaniluku	min. 80	
Metaani	min. 70	til-%
Rikkisulfidi	max. 0,05	til-%
Vety	max. 3,0	til-%
Vesi ja hiilivetylauhde ennen moottoria	ei sallittu	
Ammoniakki	max. 25	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Kloori + Fluori	max. 50	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Partikkelit ja kiinteät aineet	max. 50	mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Partikkelien tai kiinteiden aineiden koko	max. 5	µm
Kaasun sisäänmenolämpötila	0–60	°C

Maakaasu sekä muut kaasumaiset polttoaineet kuten erilaiset biokaasut ovat polttoaineena monikäyttöisiä, sillä niitä voidaan käyttää monenlaisten polttoon perustuvien voimalaitosten polttoaineena. Maakaasu sopii niin kaasuturbiinin, poltinkattilan kuin polttomoottorinkin polttoaineeksi ja sitä voidaan käyttää sekä sähkön ja lämmön erillis- että yhteistuotantoon.

## 2.4.2 Maakaasun käyttö Euroopassa nykyään

Maakaasu on tärkeä polttoaine maailman energiantuotannossa ja sen rooli tulee jatkosakin pysymään vahvana. Kansainvälisen energiajärjestön IEA:n mukaan maakaasu on maailman nopeimmin kasvava fossiilinen polttoaine, ja sen kulutus kasvaa 1,7 % prosentin vuosivauhtia vuoteen 2035 asti. Kuitenkin Euroopan unionissa arvioidaan maakaasun kulutuksen kasvavan maailman keskiarvoa vähemmän, noin 0,8 % vuodessa. Eniten maakaasun käyttö kasvaa juuri voimantuotannossa, jonka lisäksi myös maakaasun kulutus rakennusten lämmittämisessä sekä teollisuudessa kasvavat. Maakaasun käyttö energiantuotannossa kasvaa eniten OECD:n ulkopuolisissa maissa, kuten Kiinassa ja Intiassa. Maakaasuun perustuvan sähköntuotannon oletetaan kasvavan 4 300 terawattitunnista vuodessa (2009) arvoon 7 900 TWh/a vuoteen 2035 mennessä, joten uusia voimaloita tullaan rakentamaan. Kuva 2.9 esittää maakaasun kulutuksen lisäystä vuosina 2009–2035 IEA:n arvion mukaan jaoteltuna alueittain ja sektoreittain. Euroopan OECD-maissa kasvu kohdistuu suurimmaksi osaksi voimantuotantoon, mutta myös rakennusten lämmittäminen maakaasulla lisääntyy. (World Energy Outlook 2011)



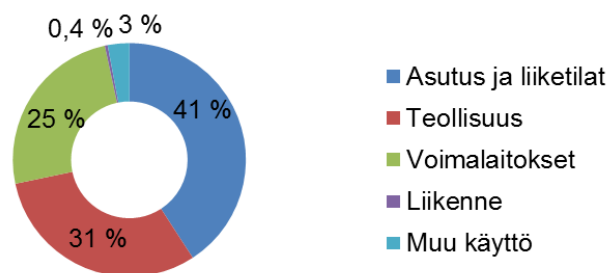
**Kuva 2.9** Maakaasun kysynnän lisäys vuosina 2009–2035 alueen ja sektorin mukaan. Muokattu lähteestä (World Energy Outlook 2011).

Maakaasulla tuotetaan maailmanlaajuisesti 22 % sähköstä (2011) ja 23,9 % primäärienergiasta (2013), vuosittain maakaasun kulutus on kasvanut keskimäärin 2,7 prosentilla. Maakaasun arvioidaan kattavan noin 24 % sähköntuotannosta vuoteen 2035 mennessä OECD-maissa, globaalisti osuus pysyy tasaisena 22 prosentissa. Euroopan Unionin alueella kaasulla tuotettiin 19 % primäärienergiasta vuonna 2010, kun vielä vuonna 2000 osuus oli 22 %. Määrällisesti Euroopan Unionissa käytettiin 392,4 Mtoe maakaasua primäärienergiantuotannossa vuonna 2012. Kaasun käytön väheneminen Euroopassa selittyy kokonaisenergiantuotannon laskulla sekä uusiutuvien energiamuo-

tojen käytön jyrkällä kasvulla. (World Energy Outlook 2011; Energy, transport 2012; BP 2013; Eurogas Statistical 2013)

Määrällisesti suurimmat Euroopan alueen maakaasun kuluttajamaat ovat Iso-Britannia, Saksa, Italia, Ukraina, Turkki, Ranska, Hollanti ja Espanja. Suhteessa maan koko energiantuotantoon suurin maakaasun käyttäjä Euroopassa on Hollanti, jossa tuotetaan 91 % primäärienergiasta maakaasulla. Kroatiaassa 53 % primäärienergiasta tuotetaan kaasulla, seuraavaksi suurimmat osuudet ovat Norjassa (45 %), Iso-Britanniassa (35 %), Tanskassa (31 %), Romaniassa (31 %) ja Italiassa (23 %). Huomattavaa on myös, että kun muualla Euroopassa maakaasun käyttö on muiden fossiilisten polttoaineiden ohella vähentynyt, Turkissa se on kasvanut koko 2000-luvun ajan yli kymmenen prosentin keskimääräisellä vuosivauhdilla. Turkissa maakaasua käytettiin vuonna 2012 jopa 2,7-kertaisesti vuoden 2002 tasoon nähden. (Energy, transport 2012; BP 2013)

Euroopassa käytetystä maakaasusta vain neljäsosalla tuotetaan voimalaitoksissa sähköä tai lämpöä, huomattavasti suuremmat osuudet ovat asutusten ja liiketilojen sekä teollisuuden maakaasun kulutuksella. Kuva 2.10 esittää Euroopan unionin maakaasun käyttöä sektoreittain vuonna 2012.



**Kuva 2.10** Maakaasun käyttö sektoreittain Euroopan unionissa vuonna 2012. Tiedot lähteestä (Eurogas Statistical 2013).

Esimerkiksi Hollannissa voimalaitoksissa sähkön tai lämmön tuotantoon käytetään vain 15 % kaikesta maassa kulutetusta maakaasusta, ja puolet käytetään rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen sekä pienissä CHP-laitoksissa sähkön ja lämmön tuottamiseen. Suomessa maakaasun kulutus on keskittynyt nimenomaan voimalaitosten ja teollisuuden sähkön- ja lämmöntuotantoon, joka kattoi 73,8 % Suomen kaasunkulutuksesta vuonna 2012. (Eurogas Statistical 2013; Suomen Kaasuyhdistys 2014)

#### 2.4.3 Arvioita tulevaisuuden maakaasun käytöstä Euroopassa

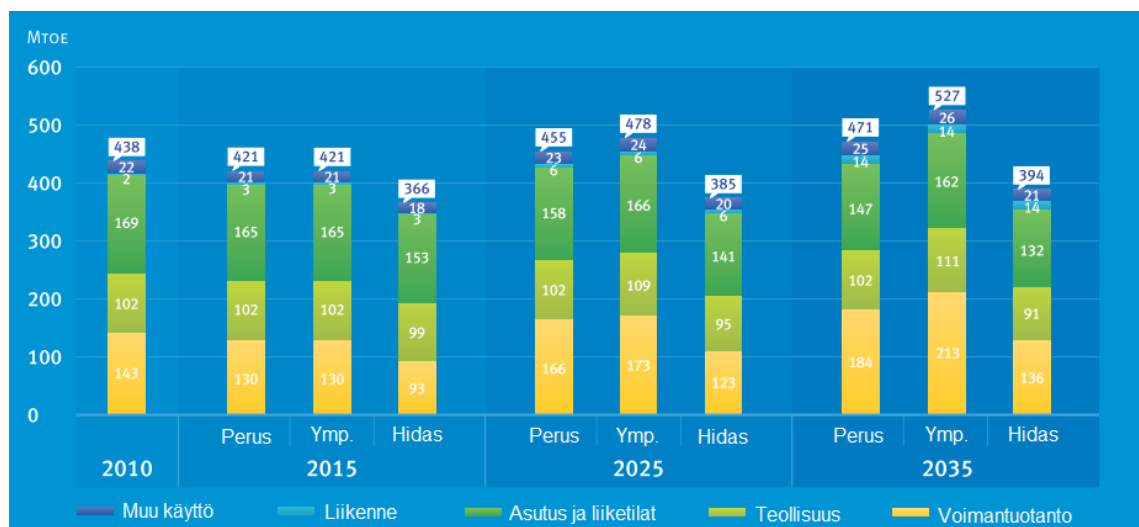
Eurogas on tehnyt ennusteita EU:n kaasunkulutukselle keskipitkällä tähtäimellä vuoteen 2035 asti kolmella erilaisella skenaariolla. Kaasunkulutusta on ennakoitu Perusskenaariolla, jossa EU:n ja jäsenmaiden energiapolitiikat eivät liiemmin panosta maakaasun käytön lisäämiseen. Ympäristö-skenaario olettaa energiakentän muodostuvan uusiutuvien energiamuotojen lisäämisen ja ydinvoiman vähentämisen ympärille sekä odottaa taloudellista kasvua ja energiatehokkaiden innovaatioiden nopeaa lisääntymistä.

Hidas-skenaarion mukaan kaasu menettää kilpailukykyään Euroopassa maailman kehityssuuntien, kaasukielteisen politiikan sekä teollisuuden heikon kehityksen takia.

Sekä Perus- että Ympäristö-kehitysarvion mukaan maakaasun käyttö Euroopan sähköntuotannossa tulee kasvamaan vuosina 2010–2035. Perus-skenaarion mukaan kaasun käyttö sähköntuotannossa kasvaa tasaisesti, uusiutuvien energianmuotojen osuus lisääntyy nopeasti, kun taas ydinvoiman ja kiinteiden fossiilisten polttoaineiden ja öljyn kulutusta vähennetään. Perus-kehitysarvion mukaan kaasun osuus sähköntuotannosta kasvaisi 28 prosenttiin vuoteen 2035 mennessä. Ympäristö-ennusteen mukaan kaasun ja uusiutuvien energiamuotojen kasvu on nopeampaa kuin Perus-skenaariossa, samoin ydinvoiman ja muiden fossiilisten käyttö vähenee huomattavasti. Ympäristö-skenaarion mukaan maakaasulla tuotetaan 33 % sähköstä Euroopassa vuonna 2035.

Hidas kehitys olettaa viime vuosien kaasun kannalta heikon kehityksen jatkuvan. Muutaman viime vuoden aikana hiilidioksidikaupan hinnat ovat olleet alhaalla taloudellisesta tilanteesta johtuen, hiilen tuontihinta on ollut kilpailukykyinen ja tiettyjä vähähii-  
liteknologioita on voimakkaasti tuettu, mitkä yhdessä ovat vaikuttaneet kaasun käytön vähenemiseen sähköntuotannossa. Hidas-skenaarion mukaan kaasun käyttö sähköntuotannossa vähenee voimakkaasti vuoteen 2015, palautuen hitaasti saavuttaen 21 % tason vuoteen 2035 mennessä.

Kuvassa 2.11 näkyy kaasun käyttö sektoreittain vuonna 2010 sekä kysyntä vuosina 2015, 2025 ja 2035 Perus-, Ympäristö- ja Hidas-kehitysnäkymien mukaan arvioituina. Kuvassa näkyy Perus- ja Ympäristö-skenaarioiden ennustama maakaasun käytön kasvu sähköntuotannossa ja liikenteessä sekä hienoinen kasvu muussa käytössä. Perus- ja Ympäristö-tulevaisuusarvioiden mukaan lämmityskäyttö niin kotitalouksissa kuin kaupallisestikin tulee vähenemään maltillisesti energiatehokkaiden ratkaisuiden ansiosta. Hidas-kehitysnäkymä ennustaa kaasun käytön vähenemistä; rakennusten lämmityksen, sähköntuotannon ja teollisuuden maakaasun käyttö vähenevät, liikenteessä maakaasun käyttö lisääntyy kuten muissakin skenaarioissa. (Eurogas Long-term 2013)



**Kuva 2.11** Maakaasun käyttö sektoreittain Eurogas:in kolmen tulevaisuuden kehitysnäkökulman mukaan vuosina 2010–2035. Muokattu lähteestä (Eurogas Long-term 2013).

Norjassa, Tanskassa sekä Hollannissa on maakaasuntuotantoa yli omien tarpeidensa, mikä näkyykin maakaasun suuressa osuudessa primäärienergiantuotannosta. Keskimäärin Euroopan maat ovat riippuvaisia tuodusta maakaasusta. EU-maiden maakaasuriippuvuuden keskiarvo on yli 60 prosenttia, yli puolet maista on täysin (> 90 %) riippuvaisia tuonnista. Kuitenkin EU-maat ja Norja tuottavat yli puolet EU:ssa kulutusta kaasusta. Seuraavaksi suurimmat osuudet EU:n maakaasumarkkinoille tuodaan Venäjältä (23 %) ja Algeriasta (9 %). (Energy, transport 2012; BP 2013; Eurogas Statistical 2013)

Samalla kun maakaasun kulutus kasvaa, myös sen kansainvälinen kauppa lisääntyy. Kansainvälisen kaupan ja lisääntyneen kilpailun myötä riskit saatavuusongelmille kasvavat. Riippuvuus yhdestä polttoaineesta voi altistaa voimakkaasti kaasun käyttöön panostaneet maat mahdollisten saatavuusongelmien myötä toimitusvaikeuksille ja hintavaihteluille. Etenkin Euroopassa varastointikapasiteetin lisääminen on nähty tärkeäksi polttoaineen toimitushäiriöiden varalle, varsinkin kun oman kaasutuotannon lisääminen ei ole juurikaan mahdollista. Varastointikapasiteetin lisäys turvaa polttoaineen saantia, mutta myös tehostaa ja laajentaa markkinoita. Euroopassa on maakaasun varastointikapasiteettia yhteensä yli 100 miljardia kuutiometriä. Eniten varastointiin ovat panostaneet Saksa, Italia ja Ranska, jotka yhteensä kattavat noin puolet koko Euroopan varastointikapasiteetista. (Energia Suomessa 2004; Eurogas Statistical 2013)

Euroopan unionin maakaasupolitiikka on vahvasti kytköksissä EU:n Venäjänpolitiikkaan. Venäjän valtaa EU-maihin maakaasun tuojana on pyritty vähentämään kiristämällä maakaasun verotusta ja rakentamalla kaasuputkia sekä nesteytetyn maakaasun (LNG, liquefied natural gas) terminaaleja, jolloin Venäjän mahdollisuudet poliittiseen vallankäyttöön maakaasun hintojen osalta vähenevät. LNG-terminaalit mahdollistavat kilpailun maakaasun tuonnissa ja siten painavat myös Venäjältä tuodun maakaasun hintaa maailmanmarkkinahinnan tasolle. Venäjän epävakaa ulkopolitiikka ja mahdolliset konfliktit aiheuttavat riskin Euroopan maakaasun tuontiin ja siten myös maakaasupohjaisen energiantuotannon investointeihin. Kuitenkin varastointikapasiteetin lisääminen ja LNG-terminaalien rakentaminen pienentävät maakaasun tuontiin liittyviä riskejä.

Kaasun käyttöön ja kilpailukykyyn tulevaisuuden Euroopassa vaikuttavat monet tekijät. Euroopan komission Energian tiekartan 2050 mukaan kaasumarkkinat vaativat yhtenäistymistä, kaasun toimittajia ja lähteitä tarvitaan laajempi valikoima ja varastointikapasiteettia enemmän, jotta kaasu säilyttää kilpailukykytunsa sähköntuotannossa. Kaasun tuotanto- ja jakeluinvestointeihin tarvitaan pitkäaikaisia toimitussopimuksia, ja kaasun hinnoittelun tulisi olla nykyistä joustavampaa, siirtyä pois puhtaasti öljyn hintaan perustuvasta hinnoittelusta. Kaasun maailmanmarkkinat muuttuvat Pohjois-Amerikan liuskekaasun lisääntyneestä hyödyntämisestä sekä nesteytetyn maakaasun laajentuneista markkinoista johtuen. Pohjois-Amerikan liuskekaasuvarantojen käyttöönottaminen kiinnittää huomion myös Euroopan ja lähialueiden epätavanomaisiin maakaasuvarantoihin, joiden hyötykäyttö vähentäisi tuontiriippuvuutta. Kuitenkin maakaasun epätavanomaisten lähteiden käyttö on Euroopassa vielä niin alkuvaiheessa, ettei voida



ennustaa, milloin ja missä määrin niitä tullaan hyödyntämään. Myös hiilidioksidin talteenoton mahdollinen yleistyminen vaikuttaa maakaasun käyttöön. Jos hiilidioksidin talteenotto ja varastointi otetaan laajamittaiseen käyttöön Euroopassa, kaasusta saattaa tulla vähähiilidioksidista teknologiaa ja siten sen asema voi olla merkittävä energiantuotantokentässä. Kuitenkin ilman hiilidioksidin talteenottoa kaasun rooli jäänee pitkällä tähtäimellä lähinnä vara- ja säätövoimaksi. (Energy Roadmap 2012)

## **2.5 Yhteenveto toimintaympäristöstä**

Euroopan unionin energiapoliittisina tavoitteina on vähentää kasvihuonepäästöjä, lisätä energiatehokkuutta ja lisätä uusiutuvien energiamuotojen osuutta energiantuotannossa. Energiatehokkuutta pyritään lisäämään direktiivillä, jonka myötä jäsenvaltioissa tulee saattaa lainsäädäntöön energiatehokkuutta lisääviä toimenpiteitä. Tällä hetkellä Euroopan sähköstä 11 % tuotetaan yhteistuotannolla, mutta tuotanto-osuudet vaihtelevat maittain muutamasta prosentista jopa lähes 50 prosenttiin. Uuden direktiivin myötä sähkön ja lämmön yhteistuotanto ja teollisuuden hukkalämpövirtojen hyötykäyttö Euroopassa lisääntynee, samoin kaukolämmön ja -jäähdytyksen voidaan olettaa vahvistavan asemiaan. EU-maissa onkin jo nyt käytössä erilaisia tukitoimia yhteistuotannon edistämiseksi. Yhteistuotannon lisäämisen ohella energiantuotanto vaatii valmistautumista hajautettuun ja vaihtelevaan tuotantoon esimerkiksi joustavien energiantuotantolaitosten, energian varastoinnin sekä uudistettujen sähkönjakelujärjestelmien avulla. Eurooppa pyrkii vähentämään kasvihuonepäästöjään ja suuntaa kohti hiilineutraaliutta, minkä oletetaan ainakin väliaikaisesti lisäävän myös maakaasun käyttöä niin energiantuotannossa kuin liikenteessä. Pitkällä tähtäimellä maakaasun tulevaisuus riippuu muun muassa hiilidioksidin talteenottotekniikan kehittymisestä, maailmanmarkkinoista ja muiden polttoaineiden käytöstä.

### 3 KAASUMOOTTORIVOIMALAITOS

Yksi laajalti käytössä oleva sähkön- tai yhdistetyn lämmön- ja sähköntuotantotekniikka on polttomoottorivoimalaitos. Uusien voimalaitoksien tehosta maailmanlaajuisesti yli 10 % tuotetaan moottorivoimaloilla. Useimmiten moottorivoimalat toimivat dieselillä tai raskaalla polttoöljyllä, mutta maakaasua käyttävät moottorivoimalat ovat yleistymässä. Uusista moottorivoimalatoimituksista lähes 20 % on käyttää kaasua polttoaineenaan. Moottorivoimalaitokset voivat käyttää polttoaineenaan myös biokaasuja, kaasutuskaasuja, prosessien hiilivetypohjaisia sivutuotteita, kasviöljyjä ja pyrolyysiöljyjä.

Moottorivoimalaitokset voivat olla hyvin erikokoisia, teholtaan muutamasta kymmenestä kilowatista muutamaan sataan megawattiin. Rakennusaste voi olla polttoöljymoottorivoimaloissa yli yhden, kaasumoottorivoimaloissa rakennusaste on korkeimmillaan välillä 0,8-0,95. Kaasumoottorivoimalaitoksissa lämpö saadaan tarkemmin talteen, joten kokonaishyötysuhteet saadaan erittäin korkeiksi, jopa 90 %. Polttoöljyllä toimivissa moottorivoimaloissa kokonaishyötysuhde voi olla korkeimmillaan 80 %. Tarkastellaan tässä luvussa maakaasua käyttävän moottorivoimalaitoksen pääkomponentteja sekä erilaisia kaasua ja monipolttoainemoottoreita.

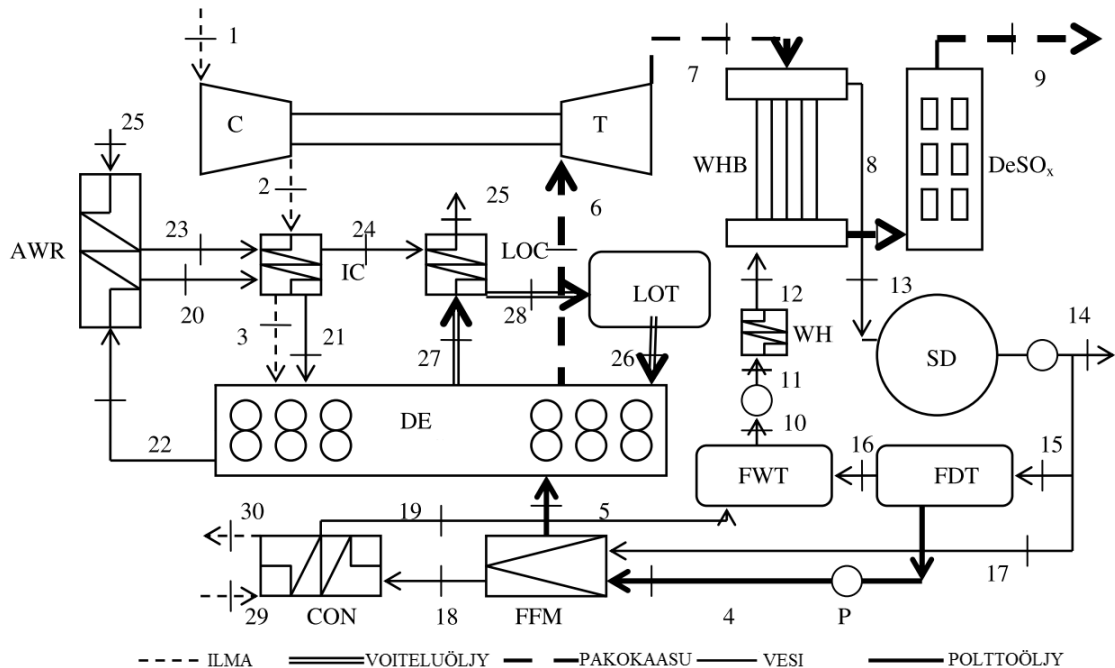
#### 3.1 Moottorivoimalaitos

Moottorivoimaloissa sähköntuotanto perustuu mäntämoottorin tuottaman mekaanisen energian muuntamiseen sähkögeneraattorissa. Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa moottorin pakokaasuista otetaan talteen lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää lämpönä tai suurissa voimaloissa siitä voidaan lisäksi tuottaa sähköä höyryturbiinissa kombikytkennässä. Voimalaitoksen pääkomponentteja ovat siis mäntämoottorit, sähkögeneraattorit, lämmöntalteenottokattilat, savukaasujen, polttoaineen ja veden puhdistus- ja käsittelyjärjestelmät sekä moottorikombivoimalaitoksessa höyryturbiini.

Moottorissa polttoaine palaa tuottaen mekaanista energiaa akselille, josta sähkögeneraattori tuottaa sähköä. Polttoaineen palaessa syntyy kuumia pakokaasuja, jotka johdetaan moottorin jälkeen lämmöntalteenottokattilaan. Pakokaasujen sisältämää lämpöenergiaa siirtyy lämmöntalteenottokattilassa virtaavaan veteen ja höyryyn, joka voidaan käyttää teollisuusprosessissa höyrynä, kaukolämmön lähteenä tai kombivoimalaitoksessa höyryturbiinin käyttövoimana sähköntuotannossa. Edelleen lämmöntalteenottokattilasta pakokaasut johdetaan tarvittaessa savukaasujen puhdistuslaitteistoon. Polttoöljykäyttöisissä voimalaitoksissa savukaasut tulee puhdistaa rikin oksideista esimerkiksi rikkipesurilla ja typen oksideista selektiivisellä katalyyttisellä reaktorilla.

Kuvassa 3.1 on erään dieselmoottorivoimalaitoksen prosessikaavio, josta näkyy moottoriprosessiin liittyvät laitteet ja järjestelmässä virtaavat aineet. Kyseisen prosessin

18-sylinterinen, nelitahtinen dieselmoottori on teholtaan noin 8,4 MW ja pakokaasukat-tila tuottaa noin 2,7 t/h höyryä, polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä. Prosessi-kaavio on vastaavanlainen myös muissa moottorivoimaloissa. (Abusoglu & Kanoglu 2009)



**Kuva 3.1** Moottorivoimalaitoksen prosessikaavio. Muokattu lähteestä (Abusoglu & Kanoglu 2009).

Moottorivoimalaitoksessa on useita väliaineita ja osaprosesseja, jotka toimivat erilaisilla lämpötilaväleillä. Tarkastellaan moottorivoimalaitosprosessia kuvan 3.1 avulla. Ahtoilma puristuu turboahtimen kompressorissa (C) ja kiertää välijäähdyttimen kautta moottoriin (DE), jossa se reagoi nestemäisen tai kaasumaisen polttoaineen kanssa muodostaen pakokaasuja. Pakokaasut paisuvat turbiinissa (T) luovuttaen energiaa ahtoilman kompressointiin ja kiertävät sitten pakokaasukattilaan (WHB), jossa ne luovuttavat lämpöenergiaa vedelle. Edelleen pakokaasut kiertävät savukaasun puhdistukseen, polttoöljyn tapauksessa rikinpoistolaitteistoon ( $\text{DeSO}_x$ ), sekä pääsevät savupiipusta ympäristöön. Moottoria jäähdyttävä kuuma jäähdytysvesi ali HT-vesi kiertää moottorista jäähdytyspiiriin. Voimalaitoksissa jäähdyttimenä on usein ilmajäähdytteinen radiaattori (AWR), laivakäytössä HT-vettä jäähdytetään usein merivesilämmönvaihtimella. Ennen paluuta moottoriin, HT-vesi jäähdyttää ahtoilmaa välijäähdyttimessä (IC) ja lämpenee sopivalle tasolle moottorin jäähdytyksen ja materiaalien kannalta. Kylmä jäähdytysvesi eli LT-vesi jäähdyttää ahtoilmaa ja voiteluöljyä. Voiteluöljy kiertää moottorista voiteluöljyn jäähdyttimen (LOC) kautta säiliöön, josta se pumpataan uudelleen moottoriin. Polttoaine pumpataan säiliöstä (FDT) polttoaineensyöttöjärjestelmän (FFM) kautta moottorin sylintereihin. Lämmöntalteenottojärjestelmän vesi pumpataan syöttövesisäiliöstä esilämmittimen kautta pakokaasukattilaan, jossa vesi höyrystyy. Vesi-höyry-seos

kulkeutuu höyrylieriöön (SD), josta kylläinen höyry ohjataan pääasialliseen lämmönkäyttökohteeseen. Pienemmät höyryvirrat ohjataan polttoainesäiliön lämmitykseen sekä polttoaineen syöttöjärjestelmään, josta vesi palaa lauhduttimen (CON) kautta syöttö-  
 vesisäiliöön. (Abusoglu & Kanoglu 2009)

### 3.1.1 Sähköntuotantoon optimoidut moottorivoimalat

Moottorivoimala voi toimia vain sähköä tuottavana laitoksena, jos lämmölle ei ole tarvetta, jolloin voimala optimoidaan tuottamaan mahdollisimman paljon sähköä. Voimalan sähköhyötysuhteeseen voidaan vaikuttaa erilaisilla ratkaisuilla. Moottorin hyötysuhdetta on parannettu ja parhaimmillaan päästäänkin jo 48 % moottorin sähköntuotantohyötysuhteisiin. Voimalassa voidaan tuottaa lisäsähköä myös turboahtimen yhteyteen kytketyllä voimaturbiinilla, jossa pakokaasujen energiaa hyödynnetään paitsi ahtoilman kompressointiin myös turbiinin pyörittämän generaattorin sähköntuotantoon. Yleensä turboahtimen turbiini ja ahdin ovat tehotasapainossa, eli kaikki turbiinilta saatava teho kuluu ahtimen pyörittämiseen. Kuitenkin turbiinilta voidaan saada enemmän tehoa kuin tarvitaan ahtimessa ilman kompressointiin, jolloin voimaturbiinilla voidaan tuottaa sähkötehoa. Voimaturbiini ja generaattori voivat olla joko samalla akselilla ahtimen kanssa tai turboahtimen lisäksi pakokaasukanavaan voidaan tehdä erillinen voimaturbiini-generaattori-kytkentä. Voimaturbiinilla voidaan kasvattaa moottorivoimalan tuottamaa sähkötehoa noin 2 %, Uusitalon (2010) mukaan jopa 10 %. Voimaturbiini kuitenkin alentaa pakokaasujen lämpötilaa ja pienentää siten pakokaasukattilasta saatavaa tehoa. Voimaturbiineja on jo käytössä joissain 2-tahtimoottoreissa. (Niemi 1997; Uusitalo 2010; Wärtsilä 2011)

Lisää sähköä voidaan tuottaa myös niin kutsutulla kombikytkennällä, jossa moottorin generaattorin lisäksi sähköä tuotetaan höyryturbiinin ajamalla generaattorilla. Pakokaasukattilassa tuotetaan korkeapaineista, tulistettua höyryä, joka ohjataan höyryturbiiniprosessiin. Yleensä höyryturbiini-generaattori-kytkentä on kannattavaa vain suurissa, useiden suurien moottorien voimaloissa, yhteisteholtaan noin yli 30 MW<sub>e</sub> suuruisissa voimaloissa. Myös yhdistetty höyryturbiiniprosessi voi lisätä moottorivoimalan sähkötehoa noin 3–9 %. (Niemi 1997; Uusitalo 2010; Ahnger 2007)

Moottorin pakokaasuista vesihöyryprosessilla saatavaa lisäsähköä rajoittaa höyryn matalat paine- ja lämpötilatasot. Lisäsähkön määrää voidaan lisätä nostamalla pakokaasukattilassa lämmönlähteenä käytettävän kaasun lämpötilaa, jolloin tuotetun höyryn määrä kasvaa ja kytketystä höyryturbiinista saadaan irti enemmän tehoa. Kaasun lämpötilaa voidaan nostaa lisäpoltinjärjestelyllä, jossa osa pakokaasuista syötetään kattilaan polttimen kautta ja osa pakokaasuista ohittaa polttimen. Polttimessa voidaan käyttää samaa polttoainetta kuin moottorissakin tai vaihtoehtoisesti myös muuta polttoainetta. Polttimen savukaasut kuumenevat jopa 1500 °C asteeseen, jolloin kattilaan virtaavan kaasun lämpötila voi olla 600–1500 °C ohituksen osuudesta riippuen. Ohitukseen kannattaa ohjata korkeintaan 80 % pakokaasuvirrasta. Kattilan höyryarvot voidaan lisäpolttimen käytöllä nostaa jopa 90–100 bar ja yli 500 °C tasolle, jolloin höyryturbiinilla voi-

daan tuottaa 30–45 % koko voimalaitoksen sähkötehosta. Lisäpoltto lisää polttoaineen kulutusta ja siten heikentää laitoksen kokonaishyötysuhdetta, mutta sillä voidaan lisätä sähköntuottoa ja parantaa rakennusastetta. Lisäpoltto mahdollistaa myös laitoksen joustavamman käytön erilaisilla lämpö- ja sähkökuormilla. (Niemi 1997)

Moottorivoimalan sähköntuotantoa voidaan lisätä perinteisen vesihöyryprosessin ohella tai sen sijasta orgaanisiin väliaineisiin perustuvien Rankine-kiertoprosessien eli ORC-prosessien avulla. ORC-prosesseja voidaan käyttää hyödyntämään sellaisia matala-arvoisia hukkalämpövirtoja, joita ei teknisistä tai taloudellisista syistä ole järkevää hyödyntää vesihöyryprosessissa. Uusitalo (2010) tutki erilaisia prosessikytkentävaihtoehtoja, joissa pakokaasuista sekä moottorin, voiteluöljyn ja ahtoilman jäähdytysvesistä saatavaa lämpöä hyödynnetään suurnopeustekniikkaan perustuvissa ORC-voimalaprosesseissa sähköntuotantoon, ja sai selville, että sähkötehon lisäys voi olla jopa 20 %, jolloin moottorivoimalan kokonaissähköhyötysuhde nousi 57 prosenttiin. Ahngerin (2007) mukaan tyypillisesti ORC-voimalalla voidaan lisätä kaasumoottorivoimalan sähköntuotantoa 8–9 %, ORC-voimaloiden kokoluokan ollessa alle 5 MW<sub>e</sub>. ORC-voimalan liittäminen moottorivoimalaan soveltuu yleensä alle 30 MW<sub>e</sub> kokoluokan laitoksissa sekä erityisesti yhden moottorin voimalaitoksissa. ORC-tekniikka on kuitenkin edelleen kehittyvä, ja korkea hinta vaikeuttaa ORC-tekniikan hyödyntämistä. (Ahnger 2007; Uusitalo 2010)

### **3.1.2 Yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon optimoidut moottorivoimalat**

Moottorivoimalaitokset ovat usein tarkoitettuja yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon, jolloin niiden suunnittelussa tulee etsiä optimi tuotteiden välillä. Yhteistuotantolaitoksissa kokonaishyötysuhde on tärkeä parametri, kun sähköä tuottavissa moottorivoimaloissa sähkötuotannon hyötysuhde on merkitsevämpi. Yhteistuotantoon optimoiduissa moottorivoimalaitoksissa päästäänkin pääsääntöisesti korkeisiin, 80–90 %:in kokonaishyötysuhteisiin.

Lämmön ja sähkön yhteistuotantoon suunnitelluissa moottorivoimaloissa pakokaasukattilassa tuotetaan yleensä kuumaa vettä tai matalapaineista höyryä. Pienissä kaasumoottoreihin perustuvissa aluelämpölaitoksissa rakennusaste on luokkaa 0,3–0,5 eli lämpöä tuotetaan yli kaksinkertaisesti sähköntuotantoon nähden. Suurissa yhteistuotantolaitoksissa rakennusaste on tyypillisesti välillä 0,8–0,95. Parantuvan rakennuskannan energiatehokkuuden ansiosta ominaislämmöntarve on pienentynyt ja tulee edelleen pienentymään, samalla kun ominaissähkönkulutus kasvaa. Näin ollen myös yhteistuotantolaitosten rakennusaste ja sähköntuotannon tarve tulevat kasvamaan. Yhteistuotantolaitoksia ajetaan perinteisesti lämmön tarpeen perusteella, mutta joitain moottorivoimalaitoksia voidaan ajaa sähkön tai lämmön tarpeen perusteella tilanteesta riippuen. Saksassa lämmön ja sähkön yhteistuotanto pienillä moottorivoimaloilla on yleistä. Yleensä tällaisissa alueellisissa lämpövoimalaitoksissa (saks. Blockheizkraftwerk) on kaasumoottoreiden lisäksi lämmityskattilat sekä lämpövarasto huippukuormaa ja lämmöntarpeen vaihtelua varten. (Niemi 1997)

Lämpöä tuotetaan moottorivoimaloiden pakokaasujen jätelämmöstä sekä myös muista moottoreiden hukkalämpövirroista, joita kaikkia tarkastellaan lähemmin luvussa 4. Tavallisimmin lämpö siirretään kuumaan veteen tai höyryyn, mutta myös muita ratkaisuja on käytössä. Esimerkiksi suora ilman lämmitys liikerakennusten, uimahallien tai muiden sellaisten yhteyteen rakennettavissa moottorivoimaloissa on myös mahdollista. Esimerkiksi Aircogen<sup>TM</sup>-tavaramerkillä valmistetaan tällaisia alle 2 MW<sub>e</sub> kaas- tai polttoöljykäyttöisiä moottorivoimaloita, joista moottorin säteily- ja konvektiohukkalämpö otetaan talteen konehuoneen ilmasta ja jäähdytys- ja pakokaasulämmöt siirretään vesihöyrypiiriin sijasta ilmaan. (Aircogen 2014)

Yhteistuotantoon parhaiten sopivat pienet ja keskisuuret moottorit, sillä suurien moottorien pakokaasujen lämpötilatasot ovat alhaiset, eikä niistä saa yhtä tehokkaasti lämpöä talteen kuin pienemmistä moottoreista. Suurien kaksitahtimoottoreiden pakokaasulämpötilat vaihtelevat välillä 210–290 °C ja nelitahtikoneiden välillä 300–370 °C. (Niemi 1997)

### 3.2 Kaasu- ja monipolttoainemoottorit

Polttomoottoreissa tuotetaan polttoaineen sisältämästä kemiallisesta energiasta lämpöenergian avulla mekaanista energiaa, joka jälleen voidaan muuntaa sähköksi. Mäntämoottorissa polttoaineen palaminen sylinterissä vapauttaa lämpöä. Kuuma palokaasu laajenee ja tekee työtä työntäen edellään mäntää. Männän liike muunnetaan akselin kiertoliikkeeksi, joka pyörittää samalla akselilla olevaa sähkögeneraattoria. Polttomoottorissa polttoaineen palaminen tapahtuu koneen sisällä, sylinterissä tai siihen liittyvässä palotilassa, mistä johtuu sen englanninkielinen nimitys ”internal combustion engine”.

Ensimmäiset polttomoottorit toimivat kaasulla, mutta nestemäisten polttoaineiden yleistyttyä kaasumaisten polttoaineiden käyttö vähentyi. Kaasumoottoreiden suosio on kuitenkin kasvanut etenkin liikennekäytössä 1990-luvulla, mutta myös moottorivoimalaitoksissa. Tiukentuvat päästörajoitukset ja maakaasun parantunut saatavuus ovat lisänneet kaasumoottoreiden suosiota.

Polttomoottoreita ja -voimaloita on hyvin erikokoisia, yhteistuotannossa on käytössä pienen mittakaavan moottorilaitoksia (15–1000 kW), keskisuuren kapasiteetin (1000–6000 kW) sekä suuren kokoluokan laitoksia (yli 6000 kW). Polttomoottorit voidaan luokitella lisäksi nopeuden mukaan nopeisiin, keskinopeisiin ja hitaisiin moottoreihin ja prosessin mukaan kaksi- ja nelitahtisiin moottoreihin. Kaasumoottorit voidaan edelleen jaotella monella tavalla. Perinteisellä prosessijaolla kaasumoottoreita on sekä diesel- että ottoprosessilla toimivia. Dieselprosessilla toimiva moottori tarvitsee sytytykseen pienen määrän nestemäistä polttoainetta, minkä vuoksi niitä kutsutaan myös kaksoispolttoainemoottoreiksi (engl. dual fuel engine). Kaasulla toimivaa ottomoottoria kutsutaan usein lyhyesti kaasumoottoriksi tai kipinäsytytteiseksi kaasumoottoriksi (engl. spark ignited gas engine). Kipinäsytytteiset kaasumoottorit voivat toimia joko laihalla tai stökiometrisellä seossuhteella. Tarkastellaan seuraavaksi kaasumoottoreiden ja mo-

nipolttoainemoottoreiden toimintaa, ominaisuuksia ja käyttökohteita. (Turunen & Niemi 2002; Energia Suomessa 2004)

### 3.2.1 Kipinäsytytteiset kaasumoottorit

Kipinäsytytteiset kaasumoottorit toimivat ottoprosessilla. Kipinäsytytteisistä kaasumoottoreista käytetään nimityksiä SG- tai SI-moottorit, jotka tulevat englanninkielisestä termistä ”spark ignited gas engine”. Kaasu syötetään moottorin imukanavaan, jossa se sekoittuu polttoilmaan. Sylinterissä kaasun ja ilman seos sytytetään sytytystulpalla puristusvaiheen lopussa, mistä johtuu nimitys kipinäsytytteinen moottori. Kipinäsytytteisissä kaasumoottoreissa voidaan käyttää joko laihaa tai stökiömetristä kaasu-ilma-seosta. Stökiömetrinen seos on nakutusherkkä, minkä vuoksi stökiömetristellä seossuhteella toimivien kaasumoottoreiden tehollinen keskipaine ja sitä kautta sylinteriteho ovat laihaseosmoottoreita alhaisemmat. Stökiömetrisen moottorin tehollinen keskipaine on luokkaa 10–15 bar ja kokonaishyötysuhde jää alhaiseksi, noin 35–37 prosenttiin, kun laihaseosmoottoreissa luvut ovat luokkaa 15–20 bar ja 42–45 %. Stökiömetrisellä seossuhteella toimivissa moottoreissa pakokaasuihin jää häkä- ja hiilivety päästöjä, jotka voidaan kuitenkin poistaa tehokkaasti kolmitoimikatalysaattorilla. Stökiömetriseen seokseen perustuvia kaasumoottoreita käytetään lähinnä pienessä kokoluokassa, jossa niitä on kehitetty menestyksekkäästi.

Laihaseosmoottorit ovat yleisempiä suuremmassa kokoluokassa niiden paremman hyötysuhteen, suuremman sylinteritehon ja pienempien päästöjen vuoksi. Laihan seoksen ansiosta polttoprosessin lämpötilataso on alhaisempi ja täten typen oksidien muodostus on vähäistä, vain murto-osan dieselmoottorin tyypillisistä arvoista. Osa työkiirroista voi kuitenkin jäädä syttymättä, mikä lisää hiilivety päästöjä ja pakoputkiston räjähdysvaaraa. Päästöjen hallinnan, tasaisen käynnin sekä hyötysuhteen kannalta onkin tärkeää varmistaa syttyminen, mitä on parannettu mm. esikammion tai heterogeenisen kaasuseoksen avulla. Hiilivety- ja hiilimonoksidipäästöjä voidaan alentaa tarvittaessa hapettavalla katalysaattorilla (Eklund et al. 1997). Kaiken kaikkiaan kipinäsytytteisillä laihaseoskaasumoottoreilla on päästy hyvin pieniin pakokaasupäästöihin jopa ilman pakokaasujen jälkikäsittelyä, mikä on ollut omiaan lisäämään niiden kysyntää.

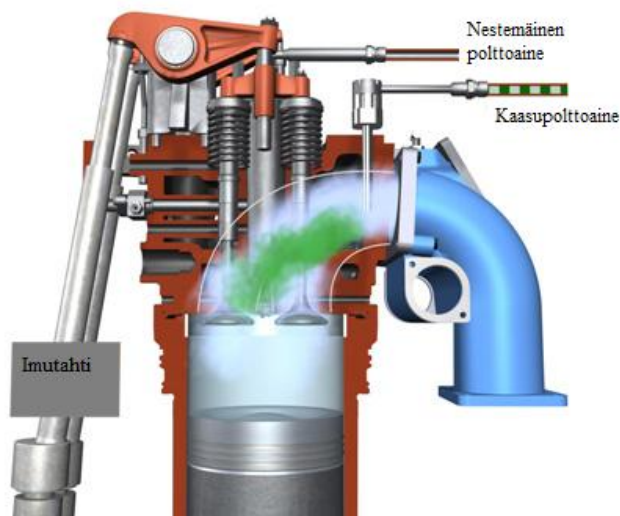
Kipinäsytytteiset kaasumoottorit eivät tarvitse sytytyspolttoaineeksi nestemäistä polttoainetta, eivätkä siten nestepolttoaineen syöttö- tai käsittelyjärjestelmiä. Tämä pienentää laitosinvestointia ja vähentää käyttökustannuksia. Kipinäsytytteiset kaasumoottorit ovat riippumattomia nestemäisestä sytytyspolttoaineesta, mutta toisaalta täydellisen riippuvaisia kaasusta. (Turunen & Niemi 2002; Energia Suomessa 2004)

### 3.2.2 Puristussytytteiset kaasu- ja monipolttoainemoottorit

Diesel- eli puristussytytteisessä kaasumoottorissa kaasun ja ilman seos sytytetään ruiskuttamalla sylinteriin puristusvaiheen lopussa pieni määrä nestemäistä polttoainetta, voimalaitoskäytössä usein kevyttä polttoöljyä eli dieselöljyä. Tämä ns. pilottipolttoaine syttyy ja sytyttää kaasun ja ilman seoksen. Puristussytytteinen kaasumoottori tarvitsee

siis jatkuvasti pienen määrän nestemäistä polttoainetta. Pilottipolttoaineen osuus on ollut muutaman prosentin luokkaa moottoriin syötettävästä kokonaispolttoainetehosta, mutta moottorien kehityssuuntana on ollut vähentää sytytyspolttoaineen määrää muun muassa pakokaasupäästöjen vähentämiseksi. Monissa uusissa moottoreissa sytytyspolttoaineen määrä on enää alle yhden prosentin polttoainetehosta. (Turunen & Niemi 2002; Energia Suomessa 2004; Pounder & Coulson 2004)

Puristussytytteisissä kaasumoottoreissa, eli kaksoispolttoainemoottoreissa, on käytössä kolme erilaista kaasunsyöttöratkaisua. Kaasu voidaan syöttää pienipaineisena turboahtimen imupuolelle tai paineistettuna imukanavaan lähelle imuventtiiliä kuten kuvassa 3.2. Kaksoispolttoainemoottoreiksi eli DF-moottoreiksi (engl. dual-fuel engine) kutsutaan tällaisia puristussytytteisiä kaasumoottoreita, joissa kaasu on sekoitettu polttoilmaan jo ennen sylinteriin tuloa. Kaasu voidaan myös puristaa suureen paineeseen ja syöttää se suoraan sylinteriin puristusvaiheen lopussa, sylinteriin syötetyn sytytyspolttoaineen jälkeen. Tällaista moottoria kutsutaan dieselkaasumoottoriksi tai GD-moottoriksi (engl. gas-diesel engine), sillä se noudattaa dieselprosessia. Kuitenkin myös dieselkaasumoottorit ovat kaksoispolttoainemoottoreita, sillä tällöinkin kaasu sytytetään nestemäisellä pilottipolttoaineella. (Turunen & Niemi 2002)



**Kuva 3.2** Kaasun syöttö imukanavaan puristussytytteisessä kaksoispolttoainemoottoris-  
sa. Muokattu lähteestä (Wärtsilä multi-fuel 2014).

Kuten ottomoottoreissa, puristussytytteisissä kaasumoottoreissa on nakutusvaara, jos kaasu sekoitetaan palamisilmaan ennen sylinteriin joutumista, jolloin mäntä puristaa ilman ja kaasun seosta. Nakutusvaaran takia puristussuhdetta on usein pienennettävä dieselmoottoriin verrattuna ja ahtoilmaa on jäähdytettävä riittävästi. Nakutustaipumus pienentää tehollista keskipainetta ja sitä kautta moottorin tehoa sekä alentaa moottorin hyötysuhdetta. Nakutusvaaran vähentämiseksi on kehitetty moottoreita, joissa voidaan käyttää entistä laihempaa seosta. Niissä sytytyspolttoaine ruiskutetaan sylinterikanteen sijoitettuun esikammioon. Sytytyspolttoaine syttyy esikammiossa, josta syttynyt seos purkautuu pääpalotilaan ja sytyttää hyvin laiha seoksen. Tällä niin kutsutulla mic-



ro-pilot järjestelmällä on saatu vähennettyä typen oksidien muodostumista ja pilottipolttoaineen käyttömäärää. Kaasun ja ilman seosta puristavien kaasumootoreiden suurimmat teholliset keskipaineet ovat noin 20–23 bar kokonaishyötysuhteiden ollessa välillä 41–48 %. Ilma-kaasuseos on laiha, ilmakerroin on luokkaa 2–2,2, mikä edesauttaa vähentämään pakokaasuja. Sytytyspolttoaineen määrä ja ruiskutustapa vaikuttavat syttymisen ja palamisen stabiiliuuteen sekä etenkin typen oksidien päästöihin. (Turunen & Niemi 2002)

Pelkkää ilmaa puristavat dieselkaasumootorit, joihin kaasua syötetään vasta puristusvaiheen lopussa, voivat toimia korkeilla tehollisilla keskipaineilla ja saavuttavat samankokoisen dieselmootorin hyötysuhdetta vain vähän alhaisemman kokonaishyötysuhteen, noin 45–47 %. Tällaisen dieselkaasumootorin tapauksessa kaasun paine tulee nostaa kompressoriyksiköllä, mikä vaatii tehoa jopa useita prosentteja moottorin akselitehosta. Suuren tehonkulutuksen lisäksi kompressoriyksikön huonoina puolina ovat sen kallis hinta ja suuri koko, minkä vuoksi dieselkaasumoottori sopii parhaiten ympäristöön, jossa jo on suuripaineista kaasua käytettävissä. (Turunen & Niemi 2002)

Kaksoispolttoainemoottoria voidaan usein käyttää myös pelkästään nestemäisellä polttoaineella, jolloin se on suunniteltu toimivan perinteisellä dieselprosessilla. Polttoaineen vaihto kaasusta nestemäiseen polttoaineeseen onnistuu keskeytyksettä ajon aikana, alle sekunnissa. Polttoöljyn käytöstä kaasuun siirtyminen tapahtuu asteittain, polttoöljyn osuutta vähennetään hitaasti samalla kun kaasun osuutta lisätään. Jos moottori on suunniteltu sekä kaasun, kevyen polttoöljyn että raskaan polttoöljyn käyttöön, sitä kutsutaan monipolttoainemoottoriksi. Kaksois- ja monipolttoainemoottorien etuna onkin niiden joustavuus polttoaineen suhteen sekä riippumattomuus kaasun saannista. (Pounder & Coulson 2004)

### 3.2.3 Moottoreiden apulaitteet ja –järjestelmät

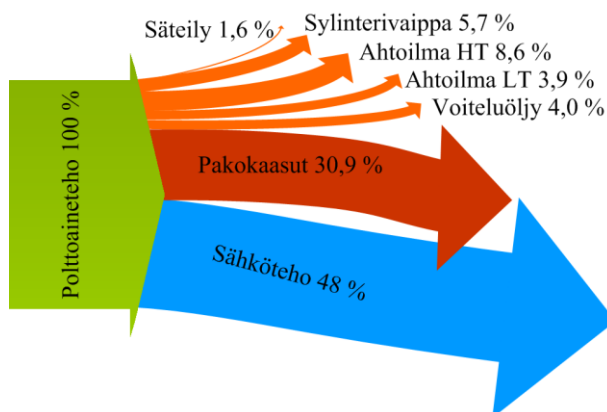
Polttomootorin apulaitteisto koostuu lähinnä moottoria jäähdyttävistä ja voitelevista systeemeistä sekä polttoaineen ja polttoilman syöttöjärjestelmistä. Polttoöljyjärjestelmä koostuu polttoainesäiliöstä ja pumpuista sekä raskaan polttoöljyn kohdalla lisäksi myös separointipiiristä. Voiteluöljyn tarkoitus on voidella sylinterivaipan ja männän väliset pinnat sekä laakerit ja mahdollisesti myös generaattorin laakerit. Voiteluöljypiiri koostuu kiertosäiliöstä, voiteluöljypumpusta, suodattimesta sekä lämmönvaihtimesta, jossa voiteluöljy jäähdytetään. Sylintereistä siirtyy voiteluöljyyn palamisjätteitä, jotka poistetaan öljystä separaattorilla. Moottoria ja siinä kiertäviä aineita jäähdytetään jäähdytysvesipiireissä, joita tarkastellaan tarkemmin seuraavassa luvussa. Palamiskaasusysteemi koostuu maakaasu-, ahtoilma- ja pakokaasupiiristä. Palamisilma imetään konehuoneesta ahtimeen, jossa sen painetta kasvatetaan. Palamiskaasun paineen nostolla saadaan moottorin tehollista keskipainetta ja siten tehoa kasvatettua. Maakaasu sekoitetaan joko ahtoilman joukkoon tai syötetään suoraan sylinteriin, moottorityypistä riippuen. Pakokaasupiiri koostuu turboahtimeesta ja lämmön talteenottokattilasta, josta pakokaasut johdetaan piippuun. (Partanen 1985; Uusitalo 2010)

## 4 MOOTTORIVOIMALAITOSTEN LÄMPÖVIR- RAT

Suuri osa moottorivoimalaitosten polttoainetehosta siirtyy erilaisiin lämpövirtoihin kuten moottorin jäähdytysvesiin tai poistuu moottorista pakokaasujen mukana. Parhaimmissakin moottorivoimaloissa sähköntuotannon hyötysuhde on 45–49 %, joten yli puolet polttoaineen sisältämästä energiasta muuttuu lämmöksi ja muiksi häviöiksi. Kuume-nevaa moottoria jäähdytetään vesikierrolla ja voiteluöljyllä. Suuri osuus polttoainete-hosta jää lämpöenergiana moottorista poistuviin pakokaasuihin. Tässä luvussa tarkastel-laan moottorivoimalaitosten lämpövirtoja ja niiden aiheuttamia lämmönsiirtotarpeita. Tarkastellaan ensin moottorijäähdytyksen hukkalämpövirtoja ja sen jälkeen pakokaasu-jen lämmöntalteenottoa.

### 4.1 Moottorin jäähdytys ja lämmöntalteenottopotentiali

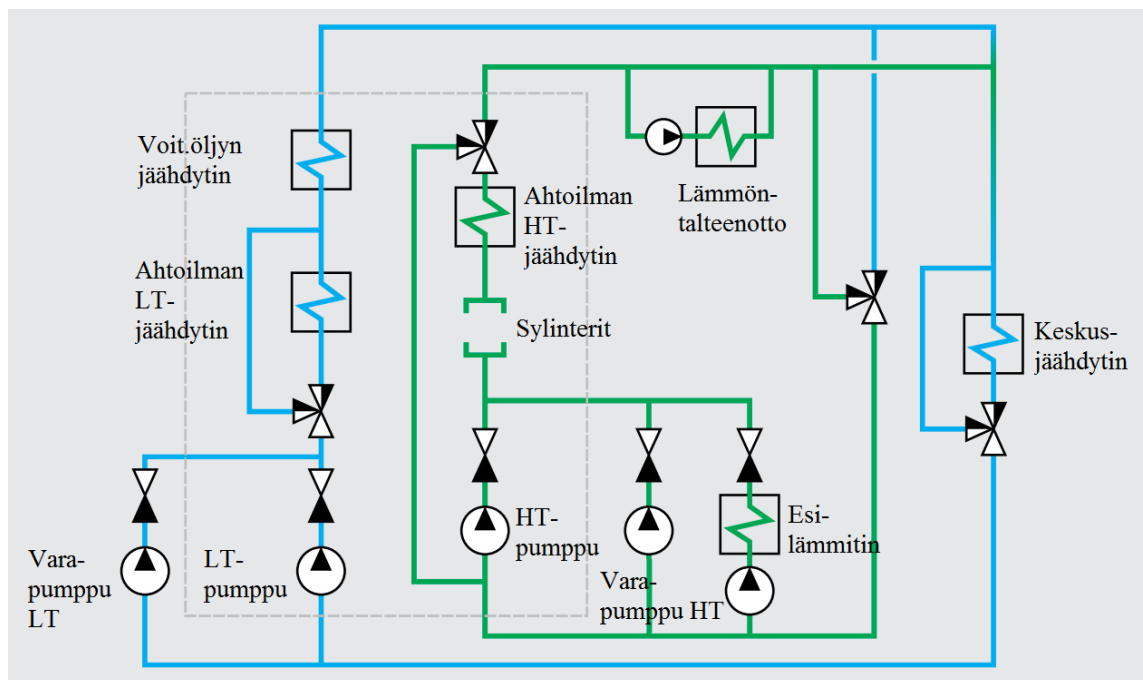
Moottorissa kiertävien jäähdytysvesipiirien pääasiallisena tarkoituksena on poistaa moottorista palamisesta aiheutunutta lämpöä sekä pitää ahtoilman ja voiteluöljyn si-säänmenolämpötilat suotuisina. Toisaalta jäähdytysvesikierrat esilämmittävät moottorin vaippaa kylmissä olosuhteissa ja mahdollistavat koneen käynnistyksen. Lämpöä poiste-taan jäähdyttämällä moottorin sylinterivaippaa ja sylinterikansia sekä ahtoilmaa kuu-malla vedellä. Lisäksi voiteluöljystä siirretään lämpöä jäähdytysvesipiiriin. Kuvaan 4.1 on kerätty Wärtsilän 18V50DF-moottorista poistuvat sähköteho ja lämpövirrat osuuksi-na polttoainetehosta, kun konetta ajetaan maakaasulla. (Wärtsilä Power Plant 2012; Heikka 2013)



**Kuva 4.1** Wärtsilän 18V50DF-moottorin sähkötehon ja lämpövirtojen osuudet polttoai-netehosta maakaasukäytössä. Tiedot lähteestä (Wärtsilä 50DF 2012).

Moottorin jäähdytysvesikierrot toimivat yleensä kahdessa eri lämpötilatasossa, jotka ovat korkean lämpötilan jäähdytysvesikierto (”high temperature” eli HT-vesi) ja matalan lämpötilatason jäähdytysvesikierto (”low temperature” eli LT-vesi). Eri lämpötilatasoilla pyritään välttämään suurien lämpötilaerojen aiheuttamat epäedulliset vaikutukset moottorin materiaaleihin. Eri lämpötilatasojen kierrot voivat toimia joko yhtenä piirinä, jossa on sekä kuuma että viileä osio, tai fyysisesti kahtena eri piirinä. Yhden piirin konfiguraatiossa LT-vedellä jäähdytetään HT-piiriä sekoittamalla niitä keskenään. Erillisten piirien järjestelyssä jäähdytyskiertojen välillä on lämmönvaihdin. Yleensä yhden piirin jäähdytinkonfiguraatio valitaan sen yksinkertaisuuden takia. Kuumaan HT-jäähdytyskiertoon kuuluvat moottorin sylinterivaipan jäähdytys sekä ahtoilman välijäähdytys. Viileämmässä LT-kierrossa jäähdytetään voiteluöljyä sekä jo HT-piirissä jäähdytettyä ahtoilmaa. Jokaisella moottorilla on oma HT-piirinsä, mutta useampi moottori voidaan yhdistää samaan LT-piiriin.

Seuraavassa kuvassa on esitetty yksinkertainen periaatekuva moottorin jäähdytyspiireistä ja niissä olevista lämmönvaihtimista, pumpuista ja venttiileistä. Korkeamman lämpötilan HT-piiri on esitetty kuvassa vihreällä ja matalamman lämpötilan LT-piiri on sinisellä värillä. Moottorin jäähdytysvesi- ja voiteluöljypiirien jäähdytys tapahtuu pääsääntöisesti neste-neste-lämmönsiirtimillä laitoksen jäähdytysvesikiertoon, josta lämpö poistetaan keskitetysti ilmajäähdytteisillä radiaattoreilla ympäristöön tai vesistön läheisyydessä keskusjäähdyttimellä vesistöön. Eri lämmönlähteiden lämpötehoja ja siten jäähdytystarpeita sekä jäähdytysvesien lämpötiloja tarkastellaan seuraavissa alaluvuissa tarkemmin.



**Kuva 4.2** Moottorin lämmönsiirtopiirit. Muokattu lähteestä (Wärtsilä Medium Speed 2010).

Tarkastellaan seuraavaksi moottorien jäähdytyksen yhteydessä Wärtsilän maakaasukäyttöisiä sekä kaksoispolttoainemoottoreita. Tarkasteltavat moottorit ovat kokoluokaltaan 4–18 MW<sub>e</sub> SG- ja DF-tyyppisiä moottoreita: 9L34SG, 16V34SG, 20V34SG, 20V34DF, 18V50DF ja 18V50SG.

#### 4.1.1 Ahtoilman jäähdytys

Polttoilmaa puristettaessa turboahtimessa paineen noustessa myös lämpötila kohoaa. Sylinterin polttoprosessin kannalta on kuitenkin välttämätöntä jäähdyttää kuumennut ahtoilma ennen sylinteriin viemistä. Ahtoilma jäähdytetään kahdessa vaiheessa, HT- ja LT-jäähdytyksessä, millä saadaan optimoitua jäähdytysteho ja lämpötilaerot. Ahtoilma kompressoidaan ympäristön paineesta noin 3–4 barin paineeseen, missä sen lämpötila kohoaa tyypillisesti noin 200 °C asteeseen. Ennen sylinteriä ahtoilma jäähdytetään 45–50 °C:een, joka on tyypillinen moottorin polttoilman sisäänmenolämpötila. Ahtoilman lämpötilaa jäähdyttimen jälkeen säädetään LT-piirin avulla. Osa LT-jäähdytysvedestä ohittaa ahtoilman jäähdytyksen, millä saadaan pidettyä ahtoilman lämpötila vakiona moottorin sisäänmenossa.

Tarkasteltaessa Wärtsilän maakaasukäyttöisiä 4–18 MW<sub>e</sub>:in kokoluokan SG- ja DF-moottoreita, ahtoilmaa jäähdytettäessä muodostuu koneesta riippuen 800–4000 kW suuruinen lämpövirta lämpötila-alueella 81–96 °C sekä 400–1500 kW suuruinen lämpövirta alueella 36–43 °C. Ahtoilman jäähdytyksen mukana prosessista poistetaan 11–14 % polttoainetehosta. (Wärtsilä Power Plant 2012; Wärtsilä 50DF 2012; Heikka 2013)

#### 4.1.2 Sylinterivaipan jäähdytys

Moottorin sylinterivaippaa, sylinterin kansia ja pakokaasuventtiilejä sekä joskus turboahdinta jäähdytetään niiden kulumisen ja liiallisen kuumenemisen ehkäisemiseksi. Sylinterijäähdytyksestä vesi kiertää ahtoilman ensimmäiseen jäähdytystasoon. Sylinterijäähdytykseen menevän veden lämpötilaa säädetään sekoittamalla siihen sopiva määrä viileämmän jäähdytyspiirin vettä, kuten kuvasta 4.2 nähdään. Luvussa 3.1 esitetyssä voimalaitoksessa sylinterijäähdytys tapahtui vasta ahtoilman jäähdytyksen jälkeen, jolloin jäähdytysveden lämpötilaa säädettiin ahtoilman jäähdytyksellä. Sylinterijäähdytys tapahtuu 74–89 °C lämpötila-alueella, joten se kuuluu korkean lämpötilan HT-jäähdytyspiiriin. Sylinterijäähdytyksessä poistettava lämpöteho on luokkaa 700–2000 kW eli se sisältää 5–7,4 % polttoaineen tehosta. (Wärtsilä Power Plant 2012; Wärtsilä 50DF 2012)

Korkeamman lämpötilan jäähdytysvesipiiriin lämpöenergiaa otetaan varsinkin suurissa voimaloissa talteen. Sitä voidaan käyttää esimerkiksi makean veden tuottamiseen erityisesti laivakäytössä, tilojen lämmitykseen tai säiliöiden lämmittämiseen. Wärtsilällä on ollut tuotevalikoimassaan myös erityisesti lämmöntalteenottoon optimoituja niin kutsuttuja Hot combustion -moottoreita, jotka on suunniteltu toimimaan kuumemmissa lämpötiloissa. Tällaisten moottoreiden HT-jäähdytysvesipiirin lämpötila on ollut jopa 110 °C. (Niemi 1997; Wärtsilä 50DF 2012)

#### 4.1.3 Voiteluöljyn jäähdytys

Voiteluöljy lämpenee kiertäessään moottorissa, ja öljyn voiteluominaisuuden lisäksi sen tarkoitus onkin poistaa moottorista lämpöä. Voiteluöljyn jäähdytys tapahtuu ahtoilman LT-piiriin sarjaankytketyllä voiteluöljyn jäähdyttimellä. Voiteluöljy kuumenee kaasumoottorissa noin 74–80 °C asteeseen ja se jäähdytetään takaisin moottorin sisäänmenolle sopivalle tasolle, noin 63 °C asteeseen. Voiteluöljyn moottorista pois siirtämä lämpötehovirta on suuruusluokkaa 500–2000 kW Wärtsilän maakaasumoottoreissa. Voiteluöljyn jäähdytyksessä prosessista poistuu 3,8–5,6 % polttoainetehosta. LT-jäähdytyspiirin veden lämpötila voiteluöljyn jäähdyttimessä on alueella 40–57 °C. Kokonaisuudessaan matalan lämpötilan jäähdytyspiirissä siirtyy 6–10 % polttoainetehosta ja se poistetaan ympäristöön 36–57 ° lämpötilatasossa. LT-piirin matalan lämpötilatason takia sen tuottamaa jätelämpövirtaa harvoin hyödynnetään, vaan useimmiten se hukataan ympäristöön keskusjäähdyttimessä. (Wärtsilä Power Plant 2012; Wärtsilä 50DF 2012)

#### 4.1.4 Generaattorin jäähdytys

Voimalaitosgeneraattorin jäähdytykseen tarvittava teho on noin 1–2 % sen pätötehosta. Generaattoria voidaan jäähdyttää joko ilmalla, vedellä tai vedyllä. Joskus generaattorin jäähdytyspiiri yhdistetään ahtoilmaa ja voiteluöljyä jäähdyttävään LT-vesipiiriin. Generaattorin jäähdytysteho on kuitenkin pieni verrattuna moottorissa syntyviin lämpövirtoihin. (Kankkunen 2009; Wärtsilä 50DF 2012)

#### 4.1.5 Yhteenveto moottorin hukkalämpövirroista

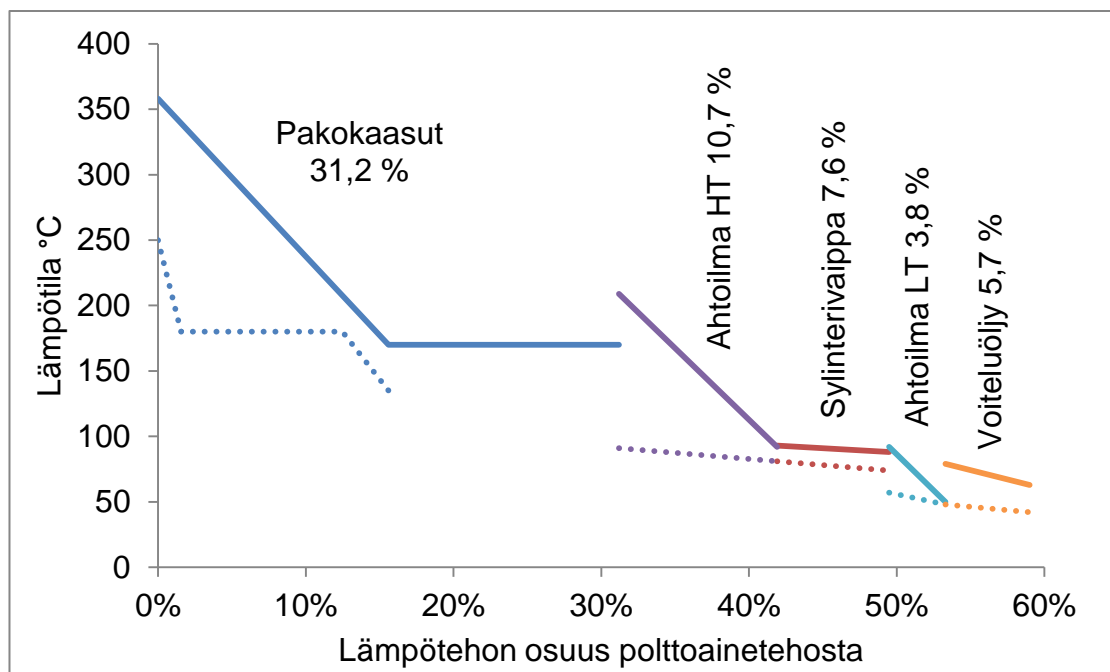
Kaasumoottorivoimalan tärkeimpien lämpövirtojen keskimääräiset kapasiteetit ja lämpötilatasot tarkastelluilla moottoreilla on koottu taulukkoon 4.3. Edellä käsiteltyjen moottorin jäähdytysvesipiirien lisäksi moottorin lämpösäteily ympäristöön aiheuttaa häviötä. Säteilyhäviöiden osuus on 1,4–1,8 % polttoainetehosta ja se poistetaan yleensä konehuoneen ilmanvaihdon avulla. Hukkalämpövirroista suurinta, pakokaasuja, ja niiden lämmöntalteenottoa käsitellään jäljempänä.

Hukkalämpövirrat ovat moottorikohtaisia, ja niiden lämpötilatasot sekä lämpötehon suhteelliset ja absoluuttiset määrät riippuvat moottorin polttoaineesta, hyötysuhteesta ja käyttöolosuhteista. Kuvissa 4.4 ja 4.5 on tarkasteltu kahden suuren kokoluokan moottorin hukkalämpövirtoja ja niiden lämpötilatasoja. Tarkastellut moottorit ovat Wärtsilän 18V50DF-moottori, jota käytetään kevyellä polttoöljyllä sekä 18V50SG-maakaasumoottori. Kussakin kuvaajassa on esitetty moottorin hukkalämmönlähteen sekä sitä jäähdyttävän vesipiirin lämpötilatasot sekä niiden lämpötehojen osuudet polttoainetehosta. Lämmönlähteen lämpötilataso on esitetty jatkuvalla viivalla ja jäähdytysvesipiirin lämpötilatasot pisteviivalla.

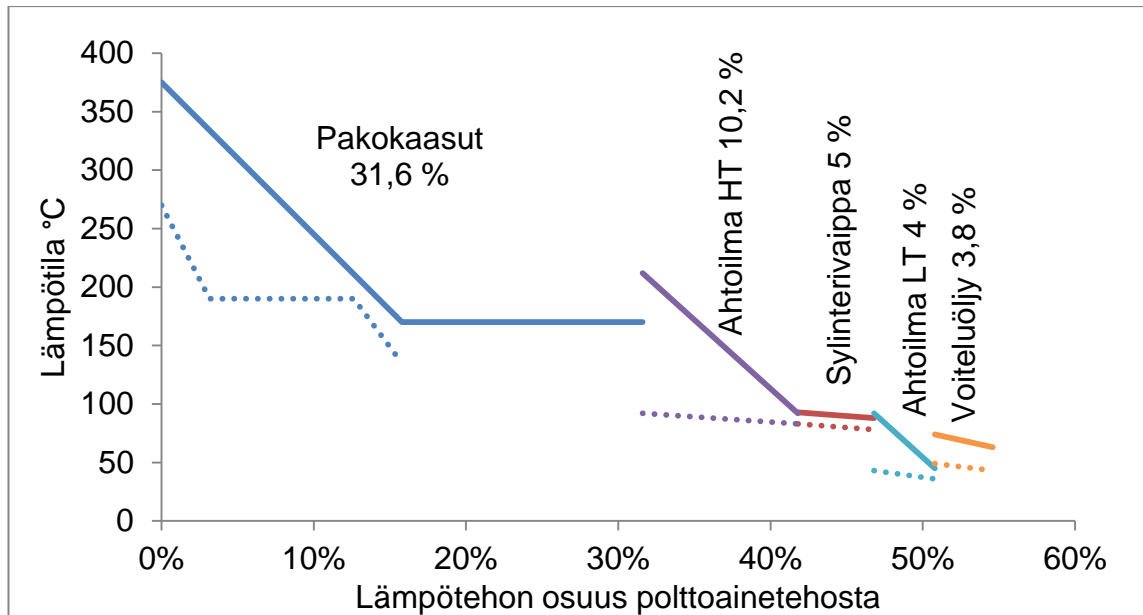
**Taulukko 4.3** Kaasukäyttöisten moottorien\* lämpövirtojen tehoalueet ja lämpötilatasot.

Lämmönlähde (jäähdytysaine)	Lämpöteho (kW)	Lämpötehon osuus polttoainete- hosta keskimäärin (%)	Lämmön- lähteen lämpötila keskimäärin sisään/ulos (°C)	Jäähdytys- veden lämpötila keskimäärin sisään/ulos (°C)
Sylinteri (HT-jäähdytysvesi)	700–2000	6,7	-	80/87
Ahtoilma (HT-jäähdytysvesi)	800–3900	8,2	207/92	87/95
Ahtoilma (LT-jäähdytysvesi)	400–1500	4,2	92/45	36/41
Voiteluöljy (LT-jäähdytysvesi)	500–1400	5,0	77/63	41/47
Säteily	100–600	1,5	-	-
Pakokaasut	2800–11900	30,3	-/383	-
Moottorin sähköteho	4300–18300	46,6	-	-

\* Wärtsilän SG- ja DF-moottorit kaasukäytöllä, sähköntuotanto 50 Hz taajuudella (9L34SG, 16V34SG, 20V34SG, 20V34DF, 18V50DF, 18V50SG). Tiedot (Wärtsilä Power Plant 2012; Wärtsilä 50DF 2012).



**Kuva 4.4** 18V50DF-kaksoispolttoainemoottorin hukkalämpövirtojen sekä jäähdytysvesien lämpötilatasot ja lämpötehot ajettaessa kevyellä polttoöljyllä.



**Kuva 4.5** 18V50SG-maakaasumoottorin hukkalämpövirtojen sekä jäähdytysvesien lämpötilatasot ja lämpötehot.

Suurimmat erot havaitaan voiteluöljyn sekä sylinterivaipan jäähdytysvesien lämpötehoissa polttoöljy- ja kaasumoottorien välillä. Kuvista havaitaan myös lämmönlähteiden erilaiset lämpökapasiteetit, pakokaasujen sekä ahtoilman lämpökapasiteetit ovat huomattavasti jäähdytysvesien ja voiteluöljyn kapasiteetteja pienemmät. Pakokaasut poistetaan kuvien tilanteissa 170 °C:ssa lämmöntalteenottokattilasta ympäristöön, jolloin pakokaasujen lämpötehosta saadaan vain osa talteen. Tarkastellaan seuraavaksi pakokaasujen energiasisältöä ja lämmöntalteenottoa.

## 4.2 Pakokaasujen lämmöntalteenotto

Polttomoottorivoimalaitoksen lämmöntalteenottokattilassa pakokaasujen lämpöenergialla lämmitetään ja höyrystetään vettä. Lämmöntalteenottokattila koostuu lämmönsiirtopinnosta, joiden yli jäähtyvien pakokaasujen lämpöenergiaa siirtyy kuumennettavaan veteen tai höyryyn. Pakokaasut sisältävät suuren osan polttoaineen tehosta, joten niiden ottaminen hyötykäyttöön on järkevää. Moottorijäähdytyksen yhteydessä tarkasteltujen Wärtsilän maakaasu- ja kaksoispolttoainemoottorien pakokaasut sisältävät 29,4–31,6 % polttoaineen tehosta poistuessaan moottorin jälkeisestä turboahtimesta. Suuruusluokaltaan lämpötehot ovat 2800–11900 kW ja niiden lämpötilataso on 370–390 °C, DF-koneiden polttoöljykytössä hieman matalampi, 340–360°C. Kyseisten moottoreiden pakokaasuvirrat ovat välillä 7–33 kg/s eli 25–120 t/h.

Lämmöntalteenottoa moottorivoimaloissa käytetään pääasiassa kolmenlaisiin sovelluksiin: yhteistuotantoon, lisäsähkön tuotantoon sekä laitoksen omakäyttöön. Yhteistuotantolaitoksissa lämmöntalteenottokattiloissa voidaan tuottaa höyryä teollisuuden prosessien tarpeisiin, kuumaa vettä kaukolämpöverkkoon tai matala-arvoista lämpöä esimerkiksi jäähdytykseen. Lisäsähkön tuotantoa varten lämmöntalteenottokattiloissa

voidaan tuottaa tulistettua höyryä joko yhdellä tai useammalla painetasolla. Voimalaitoksen omakäyttöä, esimerkiksi raskasta polttoöljyä käyttävien laitosten polttoaineen lämmittämistä varten voidaan lämmöntalteenottokattilassa tuottaa kylläistä höyryä.

Lämmöntalteenottokattilasta käytetään myös nimitystä jätelämpökattila, joka korostaa pako- tai savukaasujen lämmön sivutuote- tai jäteominaisuutta, sekä nimitystä pakokaasukattila, joka identifioi kattilan lämmönlähteen mukaan. Englanniksi käytetään nimityksiä ”waste heat recovery boiler” (lyh. WHRB) ja ”heat recovery steam generator” (lyh. HRSG). Usein edellä mainittua käytetään teollisuuden prosessien jätelämpökattiloista ja jälkimmäistä etenkin kombivoimalaitosprosessien höyrykattilasta niin kaasuturbiini- kuin moottorikombivoimalaitoksessa, mutta molempia nimityksiä käytetään myös pakokaasukattilasta. Myös englanninkielistä nimitystä ”exhaust gas boiler” käytetään etenkin moottorien jätelämpökattiloista. Lämmöntalteenottokattiloita käytetäänkin moottorivoimalaitosten pakokaasujen lämmöntalteenoton lisäksi yleisesti myös kaasuturbiinien savukaasujen lämmöntalteenottoon kombisähkö- tai yhteistuotantolaitoksessa sekä erilaisissa teollisuuden prosesseissa jätelämmön talteenottoon. Kaasuturbiinien savukaasuvirrat ovat huomattavasti kaasumoottorien pakokaasuvirtoja suurempia ja niiden lämpötilatasot kuumempia, joten kaasuturbiinivoimalaitosten savukaasukattilat ovat tässä käsiteltäviä moottorien lämmöntalteenottokattiloita kookkaampia. Kuitenkin ne ovat teknisiltä toteutuksiltaan lähellä toisiaan, joten on luonnollista sivuta myös kaasuturbiinivoimalaitosten savukaasukattiloita. (Rayaprolu 2012)

Tarkastellaan tässä luvussa lämmöntalteenoton periaatetta, erilaisia lämmönsiirrinratkaisuja, pakokaasukattiloiden lämpötila- ja painetasoja sekä lämmönlähteenä olevien pakokaasujen ominaisuuksia.

#### 4.2.1 Lämmöntalteenoton periaate

Lämmöntalteenottokattilassa tai -lämmönvaihtimessa lämmönlähteestä eli kuumista moottorin palamisprosessin pakokaasuista siirretään energiaa lämmönvaihtimessa kiertävään väliaineeseen eli useimmiten veteen. Pakokaasuvirta jäähtyy lämmittäessään vesikiertoa ja näin saadaan lämpöä talteen ennen pakokaasun päästämistä ympäristöön. Yksinkertaistettu periaatekuva pakokaasujen lämmöntalteenottojärjestelmästä on esitetty kuvassa 4.6. Pakokaasujen lämpöä voidaan ottaa talteen joko lämmöntalteenottokattilassa tai lämmönvaihtimessa. Kattilan ominaispiirteenä on höyryntuotto, kun taas lämmönvaihtimessa toisiopuolen väliaine kuumenee, mutta pysyy samassa faasissa. Tällaisissa lämmönvaihtimissa toisiopuolen väliaine voi olla kattilan vesi-höyrypiirin sijaan esimerkiksi kuuma vesi tai öljy. Tarkastellaan tässä lämmöntalteenottokattilan periaatetta.





$$Q_{\text{eko}} = \dot{m}_v \Delta h_{\text{eko}} \approx \dot{m}_v c_{p,v} \Delta T_v \quad , \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{höyr}} = \dot{m}_v \Delta h_{\text{höyr}} = \dot{m}_v l(T_{\text{kyl}}) \quad , \quad (4.3)$$

$$Q_{\text{tul}} = \dot{m}_v \Delta h_{\text{tul}} = \dot{m}_v (h(T_{\text{tul}}) - h'(T_{\text{kyl}})) \quad . \quad (4.4)$$

Yhtälöissä

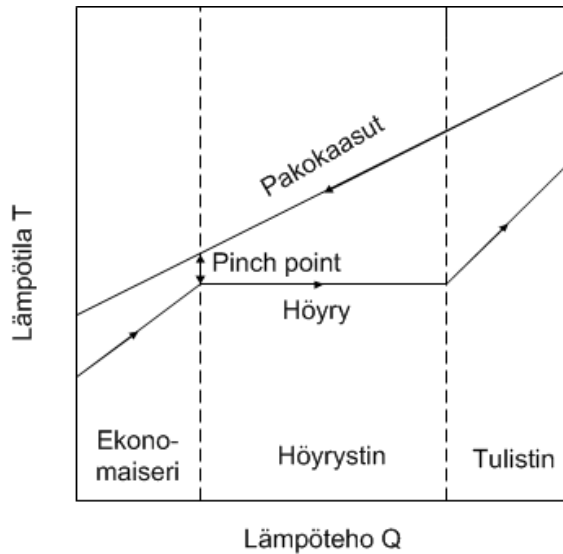
$\dot{m}_v$	on veden massavirta lämmöntalteenottokattilassa [kg/s],
$\Delta h$	veden tai vesihöyryn entalpian muutos kattilan eri osissa [kJ/kg],
$c_{p,v}$	veden ominaislämpökapasiteetti ekonomaisierissa [kJ/kgK],
$\Delta T_v$	veden lämpötilan muutos ekonomaisierissa [K],
$l(T_{\text{kyl}})$	veden faasinmuutosentalpia kyllästymislämpötilassa [kJ/kg]
$h(T_{\text{tul}})$	tulistetun höyryn entalpia [kJ/kg] ja
$h'(T_{\text{kyl}})$	kylläisen höyryn entalpia [kJ/kg].

Eri kattilakomponenteissa veden ja höyryn vastaanottamien lämpötehojen summa on yhtälön 4.1 mukainen pakokaasun luovuttama lämpöteho. Siirretty lämpöteho sekä siihen vaaditut lämmönsiirtimen parametrit tulee mitoittaa jokaiselle kattilan osuudelle erikseen.

Yksinkertaisimmillaan kattila voi toimia vain höyrystimenä, jolloin siinä ei ole ekonomaiseri- tai tulistinpintoja lainkaan. Pakokaasut kulkevat vastavirtaperiaatteella toimivassa kattilassa päinvastaiseen suuntaan. Tulistinpinnat ovat kattilan kuumimmas- sa osassa eli pakokaasut kohtaavat ne ensin ja luovuttavat kuumimman lämpötilan energiaansa höyrylle, minkä jälkeen pakokaasut virtaavat kattilan läpi höyrystimen ja ekonomaiserin sekä mahdollisten muiden lämmönsiirtopintojen ohi. Lämmöntalteenot- tokattilat toimivat käytännössä aina vastavirtaperiaatteella, jolloin voidaan minimoida lämmönsiirtoon tarvittava pinta-ala. Kuumien savukaasujen tapauksessa tulistin voidaan suunnitella toimimaan myötävirtaperiaatteella, jolloin lämmönsiirtoputkien pintalämpö- tilaa saadaan pidettyä alhaisempana (Rayaprolu 2012). Usein tälle on tarvetta vain kaa- suturbiinien savukaasujen lämmöntalteenotossa, sillä moottorin pakokaasujen lämpötilat ovat alhaisemmat.

Lämpötehon siirtymistä pakokaasuista vesi-höyrypiiriin voidaan kuvata lämpöti- la-lämpöteho-kuvaajalla eli TQ-kuvaajalla, jossa pakokaasujen ja vesihöyryn lämpötila esitetään siirtyneen lämpötehon funktiona. Kuvassa 4.7 on esitetty periaatteellinen TQ- kuvaaja yhden painetason lämmöntalteenottokattilalle, jossa on ekonomaiseri, höyrystin ja tulistin. Kuvassa pakokaasut virtaavat oikealta vasemmalle ja vesi vasemmalta oike- alle. Suurin osa siirretystä lämpötehosta tarvitaan veden höyrystämiseen höyrystimessä, mikä näkyy vesipiirin vaakasuorana, vakiolämpötilaisena osuutena TQ-kuvaajan keskel- lä. Kattilan mitoituksessa tärkeinä parametreina ovat pakokaasujen ja vesihöyryn läm- pötilaerot ja erityisesti niin kutsuttu pinch point, joka tarkoittaa pienintä lämpötilaeroa pakokaasujen ja vesi-höyrypiirin välillä. Kattilassa pinch point tarkoittaa veden höyrys- tymislämpötilan ja höyrystimestä poistuvien pakokaasujen lämpötilaeroa. Tyypillisesti pinch point mitoitetaan noin 8–25 asteiseksi optimoiden se kuitenkin tarvittavan lämpö-

tehon ja kannattavuuden mukaan. Mitä pienempi pinch point on, sitä enemmän tarvitaan lämmönsiirtopinta-alaa ja samalla kasvavat kattilan paino ja hinta.



**Kuva 4.7** Yhden painetasen lämmöntalteenottokattilan periaatteellinen  $TQ$ -kuvaaja.

Pakokaasujen luovuttama lämpöteho ja vesi-höyrypiirin vastaanottama lämpöteho saadaan laskettua edellä esitetyillä yhtälöillä. Lämpötehon, lämmönsiirtopinta-alan, lämmönläpäisykerroimen ja lämpötilaeron suhdetta kuvaa yhtälö

$$Q = UA\Delta T_{lm} \quad , \quad (4.5)$$

jossa

- $Q$  on lämpöteho [W],
- $A$  lämmönsiirtopinta-ala [ $\text{m}^2$ ],
- $U$  lämmönläpäisykerroin [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] ja
- $\Delta T_{lm}$  logaritminen keskilämpötilaero [K].

Myötä- ja vastavirtalämmönsiirtimille logaritminen lämpötilaero määritellään seuraavasti:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad , \quad (4.6)$$

jossa

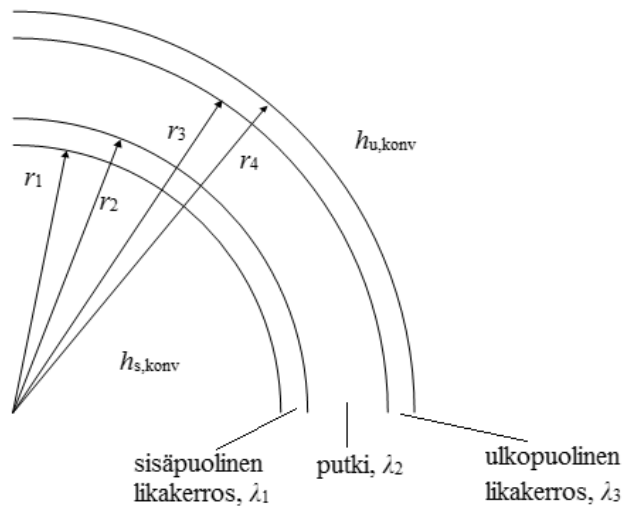
- $\Delta T_1$  virtojen lämpötilaero lämmönsiirtimen alkupäässä [K] ja
- $\Delta T_2$  virtojen lämpötilaero lämmönsiirtimen loppupäässä [K].

Kun lämpöteho tiedetään, tulee selvittää lämmönläpäisykerroin, jonka avulla tarvittava lämmönsiirtopinta-ala voidaan selvittää. Lämmönläpäisykerroin  $U$  lasketaan lämmönsiirtopinnan ja likakerrosten lämpövastusten sekä pintojen sisä- ja ulkopuolisten lämmönsiirtokertoimien avulla. Rivoitetulle putkelle tulee ottaa huomioon sekä sileän putkipinnan lämpövastus että ripapinnan hyötysuhde sekä rivoitettu kokonaispinta-ala.

Putkilämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin koostuu ulko- ja sisäpuolisista konvektiivisista lämmönsiirtokertoimista sekä putken ja sen ulko- ja sisäpinnan likakerrosten lämmönsiirtokertoimista. Lämmönläpäisykerroin putkelle voidaan täten määrittää yhtälöllä:

$$U = \left[ \frac{r_4}{r_1} \frac{1}{h_{s,konv}} + \frac{r_4 \ln(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{r_4 \ln(r_3/r_2)}{\lambda_2} + \frac{r_4 \ln(r_4/r_3)}{\lambda_3} + \frac{1}{(h_{u,konv} + h_{u,sät})} \right]^{-1}, \quad (4.7)$$

jossa  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  ja  $\lambda_3$  ovat sisäpuolisen likakerroksen, putkimateriaalin ja ulkopuolisen likakerroksen lämmönjohtavuudet sekä  $h_{s,konv}$  ja  $h_{u,konv}$  konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet putken sisä- ja ulkopuolella ja vastaavasti  $h_{u,sät}$  on putken ulkopuolinen säteilylämmönsiirtokerroin. Kuva 4.8 havainnollistaa säteitä  $r_i$  ja muita lämmönsiirtokertoimeen vaikuttavia termejä. (Raiko & Saarenpää 2010)



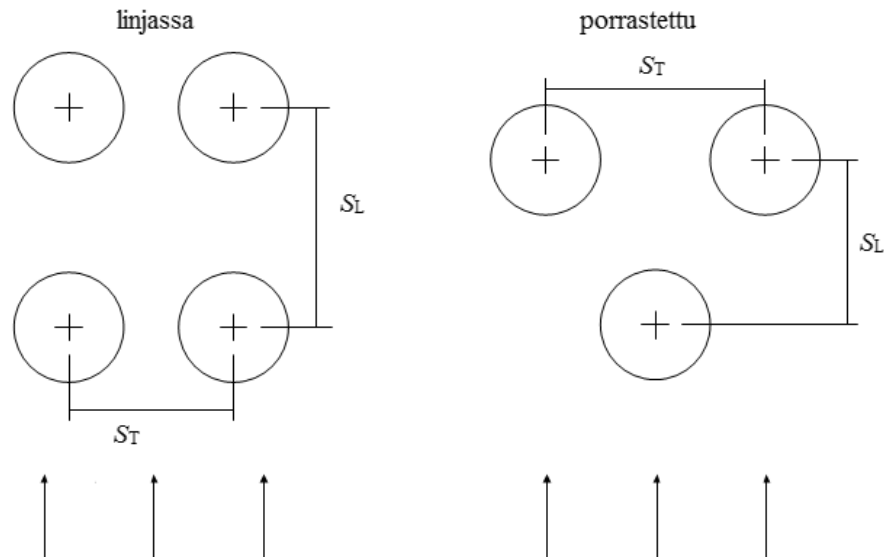
**Kuva 4.8** Putkilämmönsiirtimen säteet ja lämmönläpäisykertoimeen vaikuttavat termit.

Vesi-höyrypiirillä on yleensä korkea lämmönsiirtokerroin, samoin putken lämpövastus on usein pieni. Savukaasupuolen likakerros on yleensä selvästi vesi-höyrypiirin likakerrosta merkitsevämpi. Pakokaasukattiloissa lämpötilaerot kaasun ja höyrypiirin välillä ovat yleensä niin pienet, että säteilyn vaikutus voidaan olettaa merkitsemättömäksi. Savukaasun konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on yleensä pieni verrattuna sisäpuoliseen lämmönsiirtoon ja se pienentääkin lämmönläpäisykerrointa. Tällöin lämmönsiirron sanotaan olevan kaasupuolelta rajoitettu. Lämmönsiirtoa voidaan tehostaa kasvattamalla savukaasupuolen lämmönsiirtopinta-alaa rivoitetuilla putkilla, jolloin savukaasun nopeus kasvaa virtauspinta-alan pienentyessä ja lämmönsiirtopinta-alaa kasvaa huomattavasti sileisiin putkiin verrattuna. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voidaan laskea Nusseltin luvun avulla seuraavasti:

$$h_{konv} = \frac{\lambda Nu}{L_{kar}}, \quad (4.8)$$

jossa  $L_{kar}$  on lämmönsiirtimen karakteristinen mitta ja  $\lambda$  pakokaasun lämmönjohtavuus. Nusseltin luvulle,  $Nu$ , on kirjallisuudessa löydettyjä korrelaatioita erityyppisille ri-

voitetuille tai sileille putkille ja erilaisille putkijärjestyksille. Tyypillisesti putkirivit järjestetään joko linjaan tai porrastetusti kuvan 4.9 mukaan. (Raiko & Saarenpää 2010; Neuvonen 2011)



**Kuva 4.9** Poikittainen ja pitkittäinen putkijako eri putkijärjestyksillä.

Putken sisäpuolinen konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voidaan laskea samalla yhtälöllä (4.8) kuin putken ulkopuolinenkin, ja myös putken sisäpuolisia virtauksia kuvaavia Nusseltin korrelaatioita on kirjallisuudessa useita erilaisille tilanteille. Luvussa 5 on esitetty matalalämpöisen lämmöntalteenoton yhteydessä Gnielinskin korrelaatio Nusseltin luvulle putken sisäpuolisessa virtauksessa (yhtälö 5.31) sekä Zukauskasin Nusseltin luvun korrelaatio putkipakettien ohi virtaaville pakokaasuille (yhtälö 5.14).

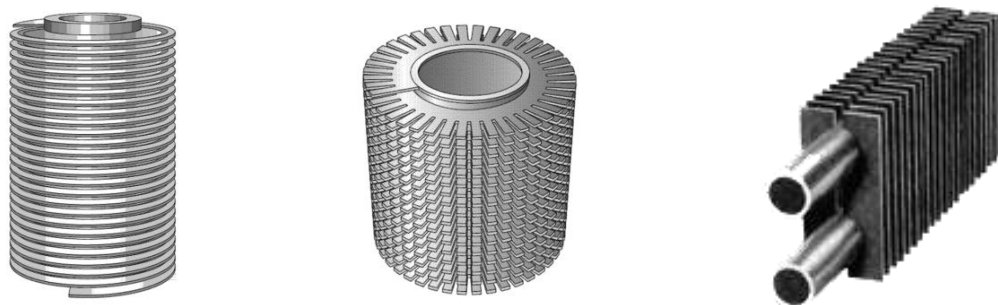
#### 4.2.2 Kattila- ja lämmönvaihdinkonstruktiot

Pakokaasut ja vesi pidetään lämmönvaihtimessa erillään lämmönsiirtopintojen avulla. Lämmöntalteenottokattiloissa lämmönsiirtopinnat ovat yleensä rivoitettuja tai sileitä putkia. Vesi ja pakokaasut virtaavat siis putkipakettien eri puolilla; jos vesi virtaa putkien sisäpuolella ja pakokaasut niiden ulkopuolella, kutsutaan kattilaa vesiputkikattilaksi, jos taas pakokaasut virtaavat putkissa veden lämmitessä tai höyrystyessä kattilavaipan sisäpuolella, kyseessä on tuliputkikattila. Kombivoimalaitoksissa käytetään yleensä vesiputkiratkaisua, sillä tuliputkikattilassa ei ole mahdollista tuottaa tulistettua höyryä. Myös kahdella painetasolla toimivat kattilat ovat aina vesiputkikattiloita. Kuumaa vettä tai yhden painetason kylläistä höyryä tuottava kattila taas voi olla tuliputkikattila.

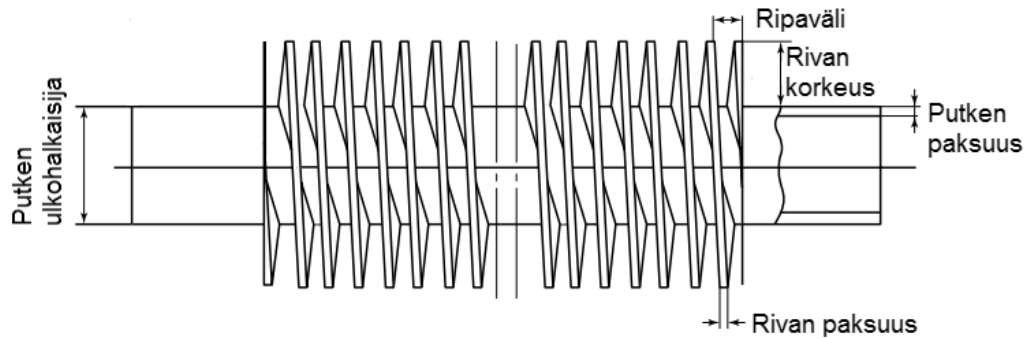
Etenkin vesiputkityyppisissä lämmöntalteenottokattiloissa putket ovat tyypillisesti rivoitettuja, jolloin kattila koostuu pääasiassa seinämistä, joiden sisällä pakokaasut virtaavat, ja useiden vierekkäisten ja päällekkäisten ripaputkien muodostamista pakeista, joissa vesi ja höyry virtaavat. Putkien rivoitus riippuu lämmönsiirtotarpeista, pakokaasujärjestelmän sallimasta painehäviöstä, pako- tai savukaasujen koostumuksesta ja

putkimateriaalin lämpötilankestosta. Rivat lisäävät lämmönsiirtopinta-alaa, tehostavat lämmönsiirtoa ja kasvattavat kattilan kapasiteettia verrattuna sileisiin putkiin. Kuitenkin ripa- ja putkivälit tulee suunnitella niin, ettei ripojen käyttö aiheuta liian suurta painehäviötä. Moottorin toiminnan kannalta on oleellista pitää moottorin jälkeinen pakokaasujen vastapaine mahdollisimman alhaisena, joten pakokaasukattila ei osana putkistoa saa aiheuttaa suurta painehäviötä kaasuvirtaan. Myös savukaasujen koostumus vaikuttaa siihen, voidaanko ripoja käyttää. Likaisten savukaasujen tuhka ja muut partikkelit kerrostuvat ripojen ja putkien pinnalle heikentäen lämmönsiirtoa ja lisäten painehäviötä. Likaiset savukaasut voivat tukkia liian tiheän rivoituksen, jolloin kaasu ei pääse virtaamaan putkien pinnalla, lämmönsiirto heikkenee ja painehäviö kasvaa virtauspinta-alan pienentyessä. Rivoitus täytyykin suunnitella savukaasujen ominaisuudet huomioon ottaen. Puhtaiden savukaasujen, kuten moottorin pakokaasujen, lämmöntalteenoton yhteydessä voidaan yleensä käyttää ripaputkia, kun likaisen, tuhkapitoisten savukaasujen yhteydessä valitaan sileät putket. Myös likakerrosten puhdistus tulee ottaa huomioon rivoitusta suunnitellessa. Vaikka maakaasu on polttoaineena puhdasta, moottorin pakokaasujen mukaanaan tuomat voiteluöljyjäämät aiheuttavat pintojen likaantumista, minkä vuoksi käytetään levyripoja kaasuturbiineissa käytettävien spiraaliripojen sijasta. Ripojen korkeus ja muoto vaikuttavat lämmönsiirtoon rivasta putkeen ja edelleen virtaavaan veteen. Ripojen ulkoreunat kuumenevat korkeampaan lämpötilaan kuin vesijäähdytteisen putken pinta. Erityisesti kuumilla savukaasuilla tämä tulee ottaa huomioon, ettei rivan lämpötila nouse materiaalin kestävyyskannalta liian korkeaksi. Kaasuturbiinien savukaasukattiloissa ripakorkeus on tyypillisesti alle 15 mm, sillä savukaasut ovat kuumia. Pakokaasukattiloissa ripakorkeus voi olla suurempi matalamman lämpötilatason takia.

Kolme erilaista ripaputkimallia on esitetty kuvassa 4.10. Vasemmalla on esitetty spiraaliripaputki, keskellä segmentoitu spiraaliripaputki ja oikealla kaksoislevyriipaputki. Ohutripaisia spiraaliripaputkia käytetään muun muassa kaasuturbiinien savukaasukattilassa, puhtaiden ja kuumien savukaasujen lämmöntalteenotossa, kun taas paksumpia levyriipaputkia käytetään likaisempien savukaasujen, esimerkiksi öljypolton yhteydessä. Ripaväli voi ohuilla rivoilla olla vain 2,5 mm ollen likaisilla savukaasuilla ja paksumpien levyriipaputkien rivoilla senttimetrin luokkaa. Spiraaliputken avulla on havainnollistettu ripaputken keskeisiä dimensioita kuvassa 4.11. (Rayaprolu 2009; Rayaprolu 2012)



**Kuva 4.10** Ripaputkimalleja: spiraaliripaputki ja segmentoitu spiraaliripaputki (Rayaprolu 2009) sekä kaksoisripaputki (Ekströms 2014)



**Kuva 4.11** Spiraaliripaputken keskeiset mitat. Muokattu lähteestä (Rayaprolu 2009).

Vesiputkityyppinen lämmöntalteenottokattila on yleensä lieriökattila erona tulipesäkattiloiden läpivirtaustyyppisiin kattiloihin. Lieriökattila voi olla joko luonnonkiertoinen tai pakkokiertoinen. Luonnonkiertokattilassa vesi-höyryseoksen kierto perustuu tiheyseroihin höyrystinputkissa, eikä kiertopumppua tarvita. Luonnonkierto voi toimia, jos tiheysero laskuputkessa ja höyrystinputkissa sekä nousuputkessa on tarpeeksi suuri. Veden tiheys on vesi-höyryseosta suurempi, mikä aiheuttaa tiheyseron ja siten myös paine-eron putkiin. Paine-ero on yhtä suuri kuin putkien virtaukseen aiheuttama painehäviö. Jos tiheysero ei ole riittävä voittamaan putken virtaukseen aiheuttamaa painehäviötä, täytyy käyttää kiertopumppua virtauskierron aikaansaamiseksi, jolloin kyseessä on pakkokiertokattila. Usein vaakamalliset pakokaasukattilat ovat pakkokiertokattiloita, kun pystymalliset voidaan tehdä luonnonkierrolla toimiviksi. Kylläisen höyryn ja kylmäisen veden tiheysero pienenee paineen kasvaessa, joten suurilla paineilla tarvitaan useammin pakkokiertoa kuin matalapainekattiloissa. Suurissa kaasuturbiinien savukaasukattiloissa painetasot ovat korkeammat, joten ainakin korkeapaineosassa tarvitaan usein kiertopumppua. Mittasuhteista ja rakenteista johtuen kaasuturbiinien savukaasukattiloista vaakamalliset ovat pystymallisia useammin luonnonkiertoisia. (Raiko & Saarenpää 2010; Rayaprolu 2012)

Vaippa-putkityyppiset tuliputkikattilat koostuvat paineastiavaipasta, jonka sisällä vesi kuumenee tai höyrystyy, ja vaipan sisällä olevista putkista, joiden läpi pakokaasut virtaavat. Tuliputkikattiloiden pinch point -lämpötilaero on yleensä taloudellisista syistä suurempi kuin vesiputkikattiloilla, sillä niiden lämmönsiirtokapasiteetti putken pituutta kohden on ripaputkiin verrattuna pienempi. Alhaiseen pakokaasujen poistumislämpötilaan ja pieneen pinch point -lämpötilaeroon vaadittaisiin pitkät putket ja siten suuri ja kallis kattila. Kuitenkin myös vaippa-putkilämmönvaihdivien lämmönsiirtopinta-alaa voidaan tehostaa rivoilla. (Pandiyarajan et al. 2010)

#### 4.2.3 Lämpötila- ja painetasot

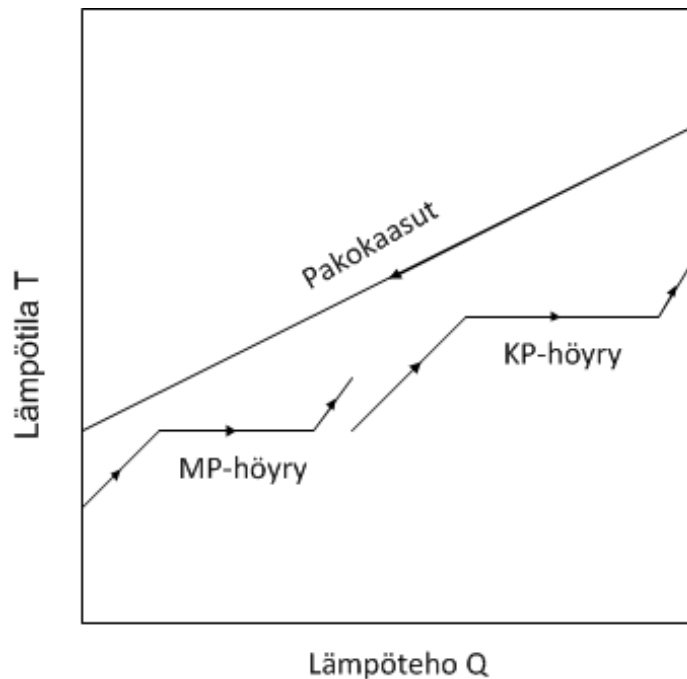
Lämmöntalteenottokattilassa voidaan tuottaa kuumaa vettä tai matalapaineista höyryä. Höyryn lämpötilaa ja painetasoa rajoittaa pakokaasujen lämpötila, kuten TQ-kuvaajasta (kuva 4.4) havaitaan, sekä tarvittavan höyryn ja käytettävissä olevan pakokaasun masavirrat. Lisäksi vesi-höyrypiirin paine riippuu käyttökohteesta. Kombivoimaprosessissa

tarvittavan höyryn paine on yleensä teollisuuden prosessihöyryn painetasoja korkeampi. Kaukolämmöntuotantoon soveltuu yleensä kuuma vesi höyryntuoton sijaan.

Kaasumoottoreiden pakokaasut tulevat lämmöntalteenottokattilaan noin lämpötilassa 370–390 °C, ja ne on perinteisesti jäähdytetty noin 120 °C:seen, mutta alhaisimmillaan noin 75–100 °C:seen. Pitämällä pakokaasujen ulostulolämpötila ja siten kattilapintojen lämpötilat kastepistettä korkeammalla vältetään vesihöyryn lauhtumiselta kattilassa ja matalalämpötilakorroosiolta. Höyryn paine riippuu pakokaasun lämpötilatasosta pinch pointin mukaan ja on tyypillisesti alle 30 baria. Kylläinen höyry voidaan tulistaa, jolloin höyry kuumennetaan korkeintaan noin 30 °C:een päähän pakokaasujen tulolämpötilasta. Kattilan syöttöveden lämpötila määräytyy halutun pakokaasun ulostulolämpötilan mukaan ollen yleensä noin 105 °C. Syöttöveden lämpötilaan vaikuttaa myös kaasunpoisto, jonka takia veden lämpötila pidetään ympäristöön nähden ylipaineessa. Syöttövesi nostetaan syöttövesipumpulla kattilan paineeseen. (Shi et al. 2011; Rayaprolu 2012)

Lämmöntalteenottokattila voi toimia joko yhdellä tai useammalla painetasolla. Yhden painetason kattilan etuina ovat yksinkertaisuus ja matalammat investointikustannukset. Usean painetason ratkaisulla saadaan tuotetun höyryn loppulämpötilaa nostettua samalla kun pidetään talteenotettu lämpömäärä korkeana. Jos kattilassa on useampi painetaso, vesi-höyrypiirien lämpötilat lähenevät pakokaasujen lämpötilaa, jolloin hyötysuhde paranee ja exergiahäviöt pienenevät. Samalla lämpötilaeron pienentyessä lämmönsiirtopintojen tarve kasvaa. Usean painetason kattilassa eri painetasoilla on omien ekonomaiseri-, höyrystin- ja tulistinpintojen lisäksi yleensä omat höyrylieriöt. Eri painetasojen piirit voidaan myös kytkeä toisiinsa siten, että korkeapainepiirin syöttövesi otetaan matalapainelieriöstä. Tällöin matalapainelieriön kautta kulkee suuri vesivirta ja häiriöt matalapainepiirissä vaikuttavat suoraan myös korkeapainepiirin toimintaan. Korkeapainepiirin pinch point voidaan mitoittaa suuremmaksi, sillä korkeapaineosan jälkeen jäljelle jäävä lämpö voidaan ottaa talteen matalapaineosassa. Usean painetason kattilassa lämpöpintojen keskinäinen järjestys optimoidaan siten, että lämpötilaero pakokaasun ja vesi-höyrypiirin välillä on mahdollisimman pieni kattilan koko matkalla. Lämpöpintoja voidaan jakaa myös osiin, jotta eri vaiheet saadaan sijoitettua sopivalle lämpötila-alueelle. Esimerkiksi eri painetasojen esilämmitinpintoja voidaan sijoittaa rinnakkain ja korkeapaine-esilämmitin voidaan jakaa useaan vaiheeseen. Moottorivoimaloiden pakokaasukattilat toimivat tyypillisesti yhdellä painetasolla ratkaisun yksinkertaisuuden vuoksi. Yleinen suuntaus on kuitenkin energiatehokkuuden lisääminen, minkä vuoksi kombivoimalaitoksissa käytetään usein kaksipaineista lämmöntalteenottoa. Kaasuturbiinin lämmöntalteenottokattilassa on lähes aina vähintään kaksi painetasoa, suuret, yli 100 MW:n kattilat toimivat yleensä kolmella painetasolla. Useammilla painetasoilla investointikustannusten nousu ei kata saatavaa lisähyötyä, eikä niitä pääsääntöisesti käytetä. Kahden painetason periaatteellinen lämpötila-lämpöteho-kuvaaja on esitetty kuvassa 4.12. (Rayaprolu 2012; Yli-Kerttula 2014)





**Kuva 4.12** Lämmöntalteenottokattilan TQ-kuvaaja, kun kattilassa käytetään kahta painetasoa.

Pakokaasun paine lämmöntalteenottokattilassa on lämmönsiirtimen, savukaasukanavan sekä savupiipun aiheuttaman painehäviön suuruinen. Pakokaasun ylipaine turboahtimen jälkeen saa olla enintään muutamia kilopascaleita, Wärtsilän maakaasumootoreissa enintään 4 kPa, jotta moottorin toiminta ei häiriinny. Moottorivalmistajat asettavatkin yleensä lämmöntalteenottokattiloille pakokaasun painehäviölle ylärajan, jonka mukaan kattila tulee mitoittaa. Pakokaasun painehäviö onkin lämmönsiirron ohella tärkeä parametri lämmöntalteenottokattiloiden suunnittelussa. (Wärtsilä 50DF 2012)

#### 4.2.4 Lämmöntalteenottokattilan apulaitteet

Pakokaasukattila tarvitsee joukon apulaitteita toimiakseen. Lämmöntalteenottojärjestelmä koostuu pakokaasukattilan lisäksi syöttövesisäiliöstä ja -pumpusta ja höyrylieriöstä. Järjestelmään voi kuulua myös prosessista riippuen pakkokierto pumpu, höyrynjakotukki, lauhdevesisäiliö ja pesuvesisäiliö.

Syöttövesisäiliö on ilmanpoistolla varustettu paineastia, johon lämmönkäyttökohteesta palautetaan vesi takaisin kattilaan syötettäväksi. Syöttövesisäiliö toimii samalla sekoitusesilämmittimenä, johon syötetään paluuveden lisäksi kylläistä höyryä höyrylieriöstä pitämään paine- ja lämpötilatasoa vakiona sekä lisävetä korvaamaan höyrypiirin häviöitä ja höyrynkulutusta. Syöttövesisäiliöstä vesi pumpataan kattilan ekonomaiseriin, josta se virtaa höyrylieriöön, ja edelleen höyrystimeen ja tulistimeen.

Höyrylieriö on paineastia, jossa kylläinen vesi ja höyry erottuvat toisistaan. Vesi painuu lieriön pohjalle, josta se päästetään laskeutumaan niin kutsuttua laskuputkea pitkin kattilan höyrystimeen. Kylläinen höyry erottuu lieriön yläosaan, josta se pääsee eteenpäin tulistimeen tai höyrynkulutuskohteeseen. Jos kattilassa on vain höyrystinosa,

höyrylieriö toimii myös syöttövesisäiliönä. Erityisesti höyrylieriö toimii syöttövesisäiliönä silloin, kun kattilassa on kaksi painetasoa. Tällöin alemman paineen höyrylieriö on kattilan syöttövesisäiliö. Höyrylieriön tulee olla asennettu korkealle voimalaitoksessa, jotta veden laskuputkeen syntyy hydrostaattista painetta, joka mahdollistaa luonnonkierron. Usein höyrylieriö asennetaan lämmöntalteenottokattilan päälle tai korkealle kattilan tukirakenteisiin, mikä myös pienentää kattilakokonaisuuden tilantarvetta. Höyrylieriö on yleensä kattilakohtainen. Jos kyseessä on pakkokierto-kattila, tarvitaan pakkokierto-pumppu laskuputkessa takaamaan höyrystimen virtaus.

Höyrylieriöstä tai tulistimesta höyry ohjataan joko suoraan höyrynkulutuskoh- teeseen tai, jos laitoksessa on useampia kattiloita, höyryvirtaukset johdetaan kootusti höyrynjakotukin kautta kulutukseen. Höyryn käyttökohteesta lauhdevesi palaa lauhde- vesisäiliöön tai suoraan syöttövesisäiliöön.

Pakokaasukattilassa on putkipakettien lisäksi muutamia muita pääkomponentte- ja. Pakokaasun ohjauspeltiä käytetään säätämään kattilaan syötettävää pakokaasuvirtaa ja tarvittaessa ohjaamaan osa kaasuvirrasta kattilan ohi savupiippuun. Kattilan lämmön- siirtopintoja puhdistetaan pakokaasujen tuomista epäpuhtauksista höyry- tai paineilma- käyttöisillä nokipuhaltimilla tai akustisella puhdistuksella.

#### **4.2.5 Pakokaasujen ominaisuudet**

Pakokaasujen ominaisuudet vaikuttavat olennaisesti lämmöntalteenottoon pakokaasu- kattilassa. Kaasumoottorin pakokaasut ovat tyypillisesti kuumempia kuin polttoöljy- käyttöisten moottorien pakokaasut, joiden lämpötila turboahtimesta poistuessaan on noin 300–360 °C (Wärtsilä 50DF 2012). Maakaasun käytön pakokaasut ovat myös omi- naislämpökapasiteetiltaan polttoöljyn pakokaasuja korkeammat. Lisäksi maakaasun ominaispiirteenä on olematon rikin määrä, minkä vuoksi pakokaasuissa ei ole rikkioksi- deja ja ne ovat täten puhtaammat. Näin myös kattilan loppulämpötilaa ei tarvitse rajoit- taa korkealle kuten polttoöljyn yhteydessä, jolloin pakokaasujen poistumislämpötila kattilasta rajoitetaan noin 170–180 °C:een happokorroosion ehkäisemiseksi. Kaksois- polttoainemoottoreiden lämmöntalteenottokattilassa täytyy myös sytytyspolttoaineen takia rajoittaa loppulämpötila noin 120 °C:een. Maakaasumoottorien pakokaasuista voi- daan ottaa talteen enemmän lämpöä kuin polttoöljykäyttöisten moottorien pakokaasuista siis sekä korkeamman sisäänmenolämpötilan ja ominaislämmön että matalamman ulos- tulolämpötilan takia. Pakokaasujen ominaisuuksia eri moottoripolttoaineilla on koottu taulukkoon 4.13.

**Taulukko 4.13** Pakokaasun koostumus ja ominaisuudet lämmöntalteenottokattilassa eri polttoaineilla.

Ympäristön olosuhteet		Pakokaasun ominaisuudet	Maakaasu	Kevyt polttoöljy	Raskas polttoöljy
Polttoilman lämpötila	25 °C	CO <sub>2</sub>	5 %	7 %	7 %
Polttoilman suhteellinen kosteus	50 %	H <sub>2</sub> O	11 %	8 %	7 %
Ilmakerroin	2,0	O <sub>2</sub>	10 %	10 %	10 %
Ympäristön ilmanpaine	101,325 kPa	N <sub>2</sub>	74 %	75 %	76 %
Pakokaasujen ylipaine kattilassa	2,0 kPa	SO <sub>2</sub>	0 %	0,003 %	0,03 %
		Keskimäär. ominaislämpökapasiteetti kattilassa	1,10 kJ/kgK	1,08 kJ/kgK	1,07 kJ/kgK
		Vesikastepiste	48 °C	42 °C	39 °C
		Happokastepiste	-	113 °C	132 °C

Taulukon pakokaasu on laskennallista maakaasukäyttöisen polttomoottorin pakokaasua, jonka laskenta on suoritettu mainituissa ympäristön olosuhteissa olettaen täydellinen palaminen. Pakokaasujen koostumus on ilmoitettu tilavuusosuuksina, ja lisäksi taulukkoon on kirjattu pakokaasujen keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti kattilassa sekä vesi- ja happokastepisteet.

#### 4.2.6 Lämmöntalteenoton reunaehdot ja häviöt

Pakokaasujen lämmöntalteenotto vaikuttaa suoraan laitoksen kokonaishyötysuhteeseen. Mitä enemmän pakokaasuista saadaan lämpöenergiaa talteen, sitä suurempi on laitoksen kokonaishyötysuhde. Pakokaasujen mukana moottorista poistuu noin 30 % syötetyn polttoaineen sisältämästä tehosta. Tavallisesti tästä energiasta saadaan talteen runsas puolet. Talteenotetun energian määrää rajoittaa etenkin pakokaasujen poistumislämpötila sekä höyrypiirin paine ja sitä kautta pinch point -lämpötila. Useimmiten kattila suunnitellaan toimimaan pakokaasun happokastepisteen yläpuolella, minkä vuoksi pakokaasun koostumus ja polttoaine vaikuttavat pakokaasun poistumislämpötilaan ja siten potentiaaliseen talteenotettavaan energiaan.

Pakokaasukattilan exergiahyötysuhde on pienin verrattuna muihin voimalaitoslaitteisiin, mikä johtuu osaltaan siitä, että pakokaasun ja höyrystettävän veden lämpötilaero on keskimäärin suuri. Exergiahäviötä voitaisiin vähentää pienentämällä keskimääräistä lämpötilaeroa aineiden välillä esimerkiksi kahden painetason kattilalla. Vielä suu-

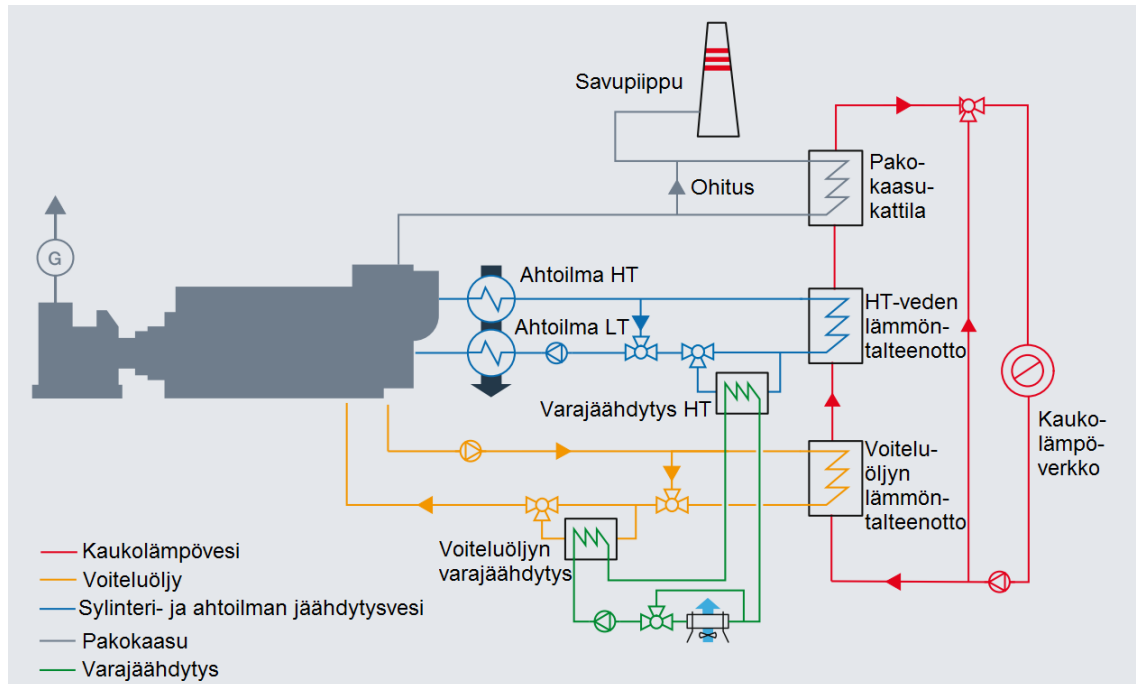
remppi merkitys on pakokaasujen poistumislämpötilalla; mitä korkeammassa lämpötilassa pakokaasut poistuvat, sitä suuremmat ovat häviöt. (Abusoglu & Kanoglu 2009)

Pakokaasun poistumislämpötilan lisäksi lämmöntalteenottojärjestelmässä on muitakin häviöitä, jotka pienentävät prosessihyötysuhdetta. Kattilan lämpösäteily ympäristöön aiheuttaa noin 0,5–1,0 % häviötehon. Lämpösäteilyä voidaan vähentää kattilan eristyksellä. Lämmöntalteenottojärjestelmä käyttää osan tuotetusta höyrystä, mistä aiheutuu omakäyttöhäviötä, sillä kaikkea tuotettua lämpöä ei johdeta päälämmönkäyttökohteeseen. Höyryä kuluu muun muassa höyrynuohoukseen sekä syöttöveden esilämmitykseen. Syöttövesisäiliön ja höyrylieriön ulospuhalluksesta aiheutuu lisäksi häviötä, jonka suuruus on 0,5–2 % kattilatehosta. Suurin lämpöhäviö johtuu kuitenkin pakokaasun korkeasta ulosmenolämpötilasta. Seuraavassa luvussa 5 käsitelläänkin mahdollisuutta ottaa pakokaasujen energiaa talteen myös matalilla lämpötilatasoilla. (Raiko et al. 1991)

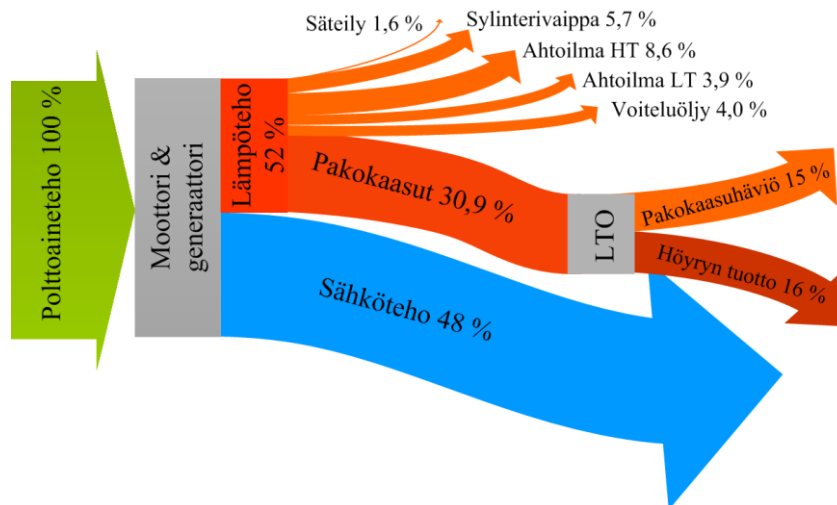
### 4.3 Moottorin jäähdytysveden ja savukaasujen lämmönsiirtopiirien yhdistäminen

Kuten edellä havaittiin, moottorista aiheutuu useita eri lämpötilatasojen hukkalämpövirtoja, joita kannattaisi ottaa hyötykäyttöön energiatehokkuuden ja laitoksen hyötysuhteen parantamiseksi. Tehostettaessa pakokaasujen lämmöntalteenottoa, voidaan sylinterin jäähdytysvettä ja ahtoilman hukkalämpöä käyttää lauhteen tai lisäsyöttöveden lämmitämiseen kattilan syöttöveden lämpötilaan.

Esimerkiksi Wärtsilä esittelee korkean hyötysuhteen jätelämmön talteenottokonseptiaan, jossa käytetään kaksipaineista pakokaasukattilaa sekä hyödynnetään moottorin hukkalämpövirtoja. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa lämmitetään korkeampaan paineeseen pumpattu lauhdevesi sylinterin jäähdytysvedellä noin 85 °C:een ja se syötetään matalapainehöyrylieriöön. Osa syöttövedestä kierrätetään ahtoilman jäähdyttimen kautta kuumeten noin 150–170 °C:een kattilan korkeapaineosan syöttövedeksi. Erityisesti Wärtsilän maakaasumoottorit on suunniteltu jäähdytysvesien lämmöntalteenottoa varten, sillä jäähdytysvesipiireille on jätetty avoimet rajapinnat mahdollistaen lämmön talteenoton kustakin halutusta lämmönlähteestä vaihtoehtona oletusarvoiselle yhdelle sarjaankytketylle jäähdytysvesipiirille. Myös MAN Diesel & Turbo esittelee moottorin jäähdytyspiirien lämmöntalteenoton yhdistämistä pakokaasukattilan kuumavesipiiriin muun muassa kaukolämmön ja -jäähdytyksen tuotannossa. Kuvassa 4.14 on esitetty eräs lämmöntalteenottoapiirien kytkentä, jolla optimoidaan lämmöntalteenottoa. Yhdistämällä lämmöntalteenotto moottorijäähdytyksestä ja pakokaasuista saadaan laitoksen kokonaishyötysuhde korkeaksi. Tällöin matalan lämpötilatason lämpöä ei hukata ympäristöön, vaan se saadaan hyötykäytettyä esimerkiksi kuumen veden tuotantoon. Paluuvien lämpötilan tulee kuitenkin olla kylmimpiä jäähdytysvesipiirejä viileämpi. Kuvan 4.14 mukaisella kytkennällä polttoainetehosta suurin osa saadaan hyötykäyttöön, mikä nähdään kuvan 4.15 polttoainetehon jakautumasta yhdistetyllä lämmöntalteenotolla. (Wärtsilä Waste Heat 2007; Wärtsilä 34SG 2011; MAN 2014)



**Kuva 4.14** Kuumen veden tuotanto yhdistetyllä lämmöntalteenotolla moottorin jäähdytyksestä ja pakokaasuista. Muokattu lähteestä(MAN 2014).



**Kuva 4.15** Polttoainetehon jakautuminen, kun moottorin jäähdytysvesipiirien ja pakokaasujen lämpöä otetaan talteen.

Etenkin pakokaasujen matalan lämpötilatason lämmöntalteenoton yhteydessä kannattaa huomioida myös LT- ja HT-jäähdytysvesipiirien lämmöntalteenottopotentiaali. Jos esimerkiksi lauhdelämpöä otetaan talteen lämpötila-alueella 30–50 °C, voidaan vesipiiriin todennäköisesti kytkeä LT-jäähdytysvesipiiri, joka toimii noin lämpötila-alueella 36–47 °C, sekä lämmittää näitä edelleen HT-vesillä esimerkiksi pakokaasujen korkean lämpötilatason lämmöntalteenottokattilan syöttövedeksi.

## 5 PAKOKAASUJEN LATENTTILÄMMÖN TALTEENOTTO

Edellisessä luvussa havaittiin moottorivoimalassa erilaisia lämpövirtoja ja käsiteltiin näistä talteenotettavan energian potentiaalia keskittyen perinteiseen lämmöntalteenottoon pakokaasuista. Energiategohokkuusvaatimukset sekä huoli ilmastomuutoksesta lisäävät mielenkiintoa myös vaikeammin hyödynnettäviin energiansäästö- ja energiantuottomahdollisuuksiin. Kiinnostus on kasvanut myös matalan lämpötilatason pakokaasujen lämmöntalteenottoa kohtaan, jota käyttämällä voidaan kasvattaa voimalaitoksen hyötysuhdetta sekä säästää primäärienergianlähteitä hyötykäyttämällä pakokaasujen jätelämpö entistä tarkemmin. Energian hinnan noustessa erilaisten teknisten ratkaisujen kannattavuus paranee ja voidaan ottaa käyttöön ennen kannattamattomia ratkaisuja.

Tässä luvussa tarkastellaan matalan lämpötilatason lämmöntalteenottoa ja erityisesti latenttilämmön talteenottoa sekä latenttilämpöön vaikuttavia tekijöitä. Luvussa esiintyvien matalan lämpötilatason lämmöntalteenottoon liittyvien pakokaasujen ominaisuuksien laskentaan käytetään MS Exceliä. Kaasulle kehitetään muuttuvat olosuhteet huomioiva savukaasuanalyysi ja vesi-höyrypiirissä käytetään tunnettuja korrelaatioita termodynaamisille suureille. Lisäksi luodaan analyttinen malli matalan lämpötilatason tuntuvan ja latenttilämmön talteenotolle sekä pakokaasujen kosteuden lauhtumiselle.

### 5.1 Pakokaasujen ominaisuuksien ja energian laskenta

Pakokaasujen ominaisuudet riippuvat käytetystä polttoainemaakaasusta sekä moottori- tai polttoprosessin keskeisistä piirteistä sekä ympäristön olosuhteista. Matalan lämpötilatason ja latenttilämmön talteenoton laskentaa varten laadittiin MS Excel –pohjainen pakokaasujen ominaisuuksia ja energioita laskeva ohjelma Alfa Laval Aalborg Oy:n käytössä olevaan lämmöntalteenottokattiloiden mitoitusohjelman yhteyteen. Laskenta huomioi muuttuvat ympäristön ja moottoriprosessin olosuhteet ja maakaasun tai polttoöljyn ominaisuudet. Vesi-höyrypiirissä käytetään tunnettuja korrelaatioita ja taulukoituja arvoja termodynaamisille suureille. Vesi- ja happokastepisteen laskennassa käytettäviä korrelaatioita tarkastellaan jäljempänä.

Laskentaohjelma laskee valitun polttoaineen ja annettujen ympäristöolosuhteiden sekä polttoprosessin pääominaisuuksien avulla savukaasuanalyysin olettaen täydellisen palamisen. Pakokaasujen ominaisuudet voidaan myös syöttää ohjelmaan, jos koostumus on tiedossa. Pakokaasujen koostumuksen perusteella ohjelma laskee vesi- ja happokastepisteet sekä saatavana olevan tuntuvan ja latentin energian annetuilla sisäänmeno- ja ulostulolämpötiloilla.

Seuraavissa luvuissa esitettyjen pakokaasujen ominaisuuksien laskentaan on käytetty tyypillistä voimalaitosmaakaasua, joka koostuu pääosin metaanista, etaanista ja tpestä sekä muista hiilivedyistä ja hiilidioksidista. Laskennassa käytetyn maakaasun koostumus yhdisteiden mooliosuuksina sekä alkuaineittain massaosuuksina on esitetty taulukossa 5.1.

**Taulukko 5.1** Laskennassa käytetyn maakaasun koostumus (Blanco & Peña 2007).

Komponentti	Mooliosuus	Alkuaine	Massaosuus
Metaani	89,0 %	Hiili	71,1 %
Etaani	5,1 %	Vety	22,7 %
Propani	1,3 %	Typpi*	6,2 %
Butaani	0,6 %	Rikki	0 %
Pentaani	0,1 %	Happi	0 %
Heksaani	0,1 %		
Typpi	3,5 %		
Hiilidioksidi	0,3 %		

\* Tässä yhteydessä typeksi on laskettu myös inertti hiilidioksidi, joka ei polttoprosessissa reagoi.

Lisäksi laskennassa on oletettu ympäristössä normaali ilmanpaine (101,325 kPa) sekä jätelämpökattilassa pakokaasupuolella 2 kPa ylipaine, ellei toisin ole mainittu. Muut oletetut ympäristön olosuhteet sekä moottorin yli-ilmakerroin on kerrottu kunkin laskennan tuloksien yhteydessä. Latenttienergian laskennan perusteita kuvataan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa. Kuva käytetystä savukaasuanalyysistä on esitetty liitteessä 2.

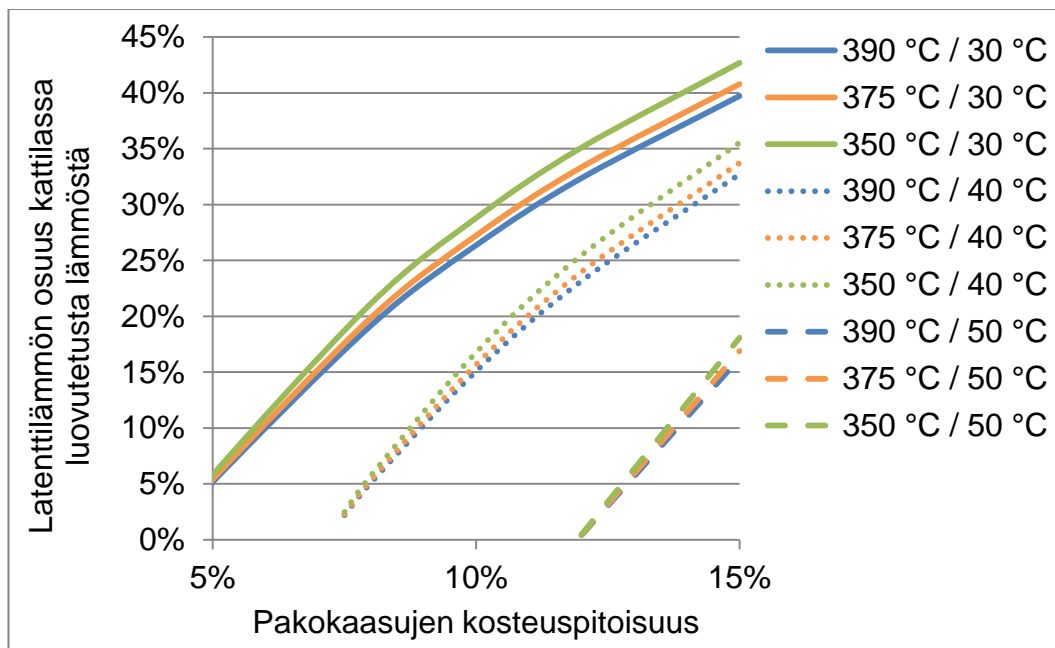
## 5.2 Latenttilämpö pakokaasuissa

Pakokaasut sisältävät vesihöyryä, joka on peräisin polttoilmasta ja polttoaineen vedyn palamisesta. Vesihöyryn määrä riippuu täten ympäristön ilmankosteudesta ja polttoaineen vetypitoisuudesta ollen maakaasua poltettaessa moottorin pakokaasuissa luokkaa 8–15 til-%. Kaasuturbiinin savukaasuissa vesihöyrypitoisuus on tyypillisesti n. 8 % vaihdellen välillä 5–15 %, kun se perinteisessä kattilapoltossa voi olla paljon suurempi, yli 20 %:n luokkaa (Shi et al. 2011). Tämä vesihöyry pitää sisällään tuntevan lämmön lisäksi suuren määrän latenttienergiaa eli höyryn ja veden välisen faasimuutoksen energiaa, joka voidaan saada talteen lauhduttamalla pakokaasujen vesihöyry vedeksi.

Latenttilämmön talteenotolla on suuri potentiaali niin voimalaitoksissa kuin teollisuuden prosesseissa, joissa yleensä hyödynnetään vain kuumia savukaasuja ja päästetään suuri osa savukaasujen sisältämästä energiasta hukkaan. Savukaasujen vesihöyryn lauhdelämmön talteenotto ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Suurin ongelma on matala lämpötilataso, riippuen savukaasun koostumuksesta veden kastepiste on välillä 40–65 °C, jonka alle savukaasu täytyy jäähdyttää, jos latenttilämpöä halutaan hyödyntää. Näin ollen jätelämpöä hyödyntävän lämpönielun tulee toimia matalilla lämpötiloilla, noin

välillä 30–60 °C. Toinen suuri haaste on lauhtuneen veden aiheuttama korroosio lämmönsiirtopinnoilla.

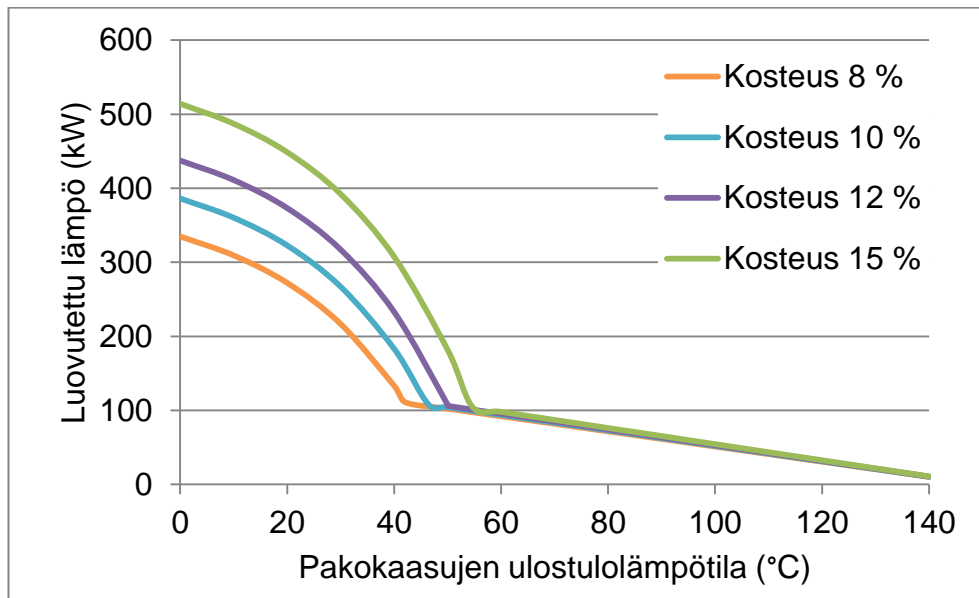
Pakokaasujen energiasta suuri osa on sitoutuneena vesihöyryyn, jota lauhduttamalla energia voitaisiin ottaa hyötykäyttöön. Käyrästä kuvassa 5.2 esittää latenttilämmön osuutta kaikesta lämmöntalteenottokattilassa luovutetusta lämmöstä pakokaasujen kosteuspitoisuuden funktiona kattilan sisäänmeno- ja ulostulolämpötilojen muuttuessa 350–390 °C ja 30–50 °C välillä. Kuvasta nähdään, että latenttilämmön osuus koko kattilassa talteenotetusta lämmöstä voi olla jopa yli 40 %, jos pakokaasujen kosteuspitoisuus on suuri ja ne jäähdytetään alhaiseen lämpötilaan. Pakokaasujen kosteuspitoisuus luonnollisesti kasvattaa latenttilämmön määrää. Lisäksi havaitaan, että mitä matalampi on ulostulolämpötila, sitä enemmän latenttilämmöllä on merkitystä, sillä sitä suurempi osa vesihöyrystä pääsee lauhtumaan. Kattilan matalissa lämpötiloissa tuntuvalle lämmöllä on vain pieni merkitys, kastepisteen alapuolella se on vain 10–15 % pakokaasujen luovuttamasta lämmöstä. Korkeammilla sisäänmenolämpötiloilla tuntuvan lämmön osuus kasvaa ja suhteellisesti latenttilämmön osuus kokonaislämmöstä pienenee. Talteenotettu lauhdelämpö riippuu siis pakokaasujen kosteudesta ja vesikastepisteestä, jota tarkastellaan jäljempänä, sekä oleellisesti pakokaasujen ulostulolämpötilasta. Lauhdelämmön laskennassa on oletettu, että pakokaasut ovat poistuessaan edelleen kyllästyneet vesihöyrystä. Oletus perustuu Jeong et al. (2010) tekemään havaintoon, että pakokaasut ovat poistuessaan lauhduttavasta lämmönsiirtimestä kyllästyspisteessä. Näin ulostulolämpötilasta voidaan laskea pakokaasujen kosteuspitoisuus jätelämpökattilan ulostulossa ja sitä kautta lauhtuneen vesihöyryn määrä ja luovuttama energia.



**Kuva 5.2** Pakokaasujen latenttilämmön osuus kattilassa luovutetusta lämmöstä pakokaasujen kosteuspitoisuuden funktiona kattilan sisäänmeno- ja ulostulolämpötilan muuttuessa.



Kuten aiemmin havaittiin, latenttilämmön talteenottopotentiaali on voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta, johon pakokaasut jäähdytetään. Seuraava kuva havainnollistaa pakokaasuista alhaisilla lämpötiloilla saatavilla olevaa energiaa. Pakokaasujen luovuttama lämpö on laskettu olettaen 150 °C jätelämpökattilan sisääntulolämpötila, eli että pakokaasuista korkeammilla lämpötiloilla saatavilla oleva lämpö on jo otettu talteen, joten kuvaaja esittää potentiaalista lisälämmöntalteenottoa alhaisilla lämpötiloilla. Pelkän tuntevan lämmön luovutuksen alue näkyy kuvassa suorana. Kastepisteen alapuolella lauhtuva vesihöyry kasvattaa luovutetun lämmön määrää nopeasti verrattuna luovutettuun tuntuvaan lämpöön, mikä näkyy kuvassa jyrkkänä kulmakertoimen muutoksena 42–55 °C kohdilla eri pakokaasujen kosteuspitoisuuksilla. Havaitaan, että pakokaasut luovuttavat saman energiamäärän jäähdytettäessä ne sisäänmenolämpötilasta kastepisteeseen, noin 100 °C viileämmiksi, kuin jäähdytettäessä niitä kosteuspitoisuudesta riippuen vain 7–13 °C kastepisteen alapuolelle, jolloin vapautuu tuntevan lämmön lisäksi suuri määrä latenttilämpöä.

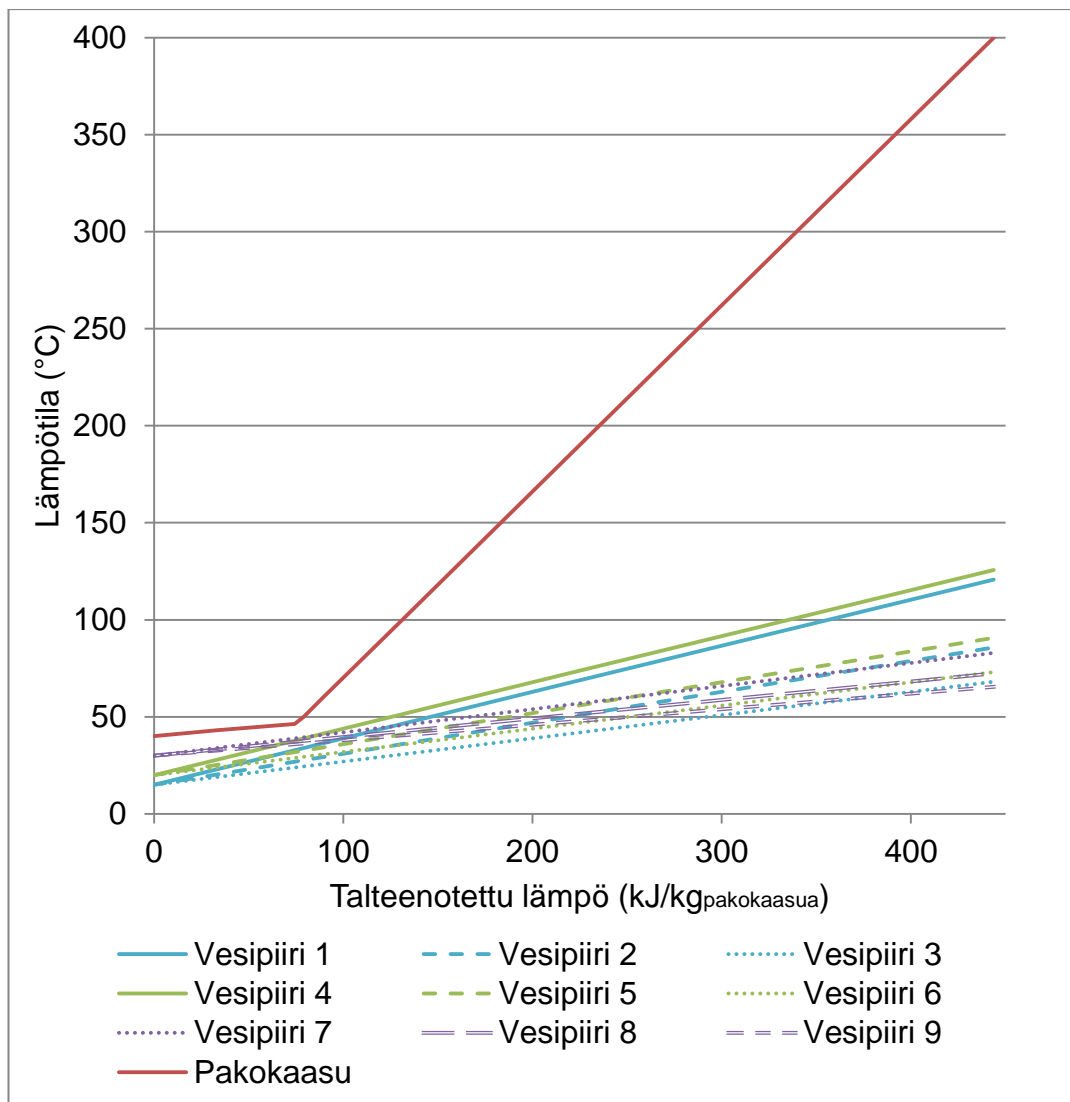


**Kuva 5.3** Pakokaasuista alhaisilla lämpötiloilla saatavilla oleva lämpöteho ulostulolämpötilan ja kosteuspitoisuuden funktiona, kun pakokaasun massavirta on 1 kg/s.

Lauhdelämmön talteenotto ja hyötykäyttö parantavat voimalaitoksen tai teollisuusprosessin lämpöhyötysuhdetta merkittävästi, jopa kymmenillä prosenteilla. Polttoaineen energiasisältö ilmoitetaan tehollisen eli alemman lämpöarvon (engl. lower calorific value, LCV tai lower heating value, LHV) mukaan, jolloin oletetaan muodostuneen vesihöyryn olevan prosessista poistuessaan kaasumaisessa muodossa. Jos tämä latenttilämpö saadaan hyödynnettyä, voidaan päästä yli sadan prosentin kokonaislämpöhyötysuhteisiin. Savukaasun lauhduttimissa voidaan ottaa talteen polttoainevedyn muodostaman vesihöyryn lisäksi polttoilman kosteuden ja kosteiden polttoaineiden, kuten biomassojen, yhteydessä myös polttoaineen sisältämän kosteuden lauhtumislämpö.

### 5.2.1 Lauhduttavan lämmönsiirtimen lämmöntalteenottopotentiali

Tarkastellaan pakokaasujen tuntevan ja latentin lämmön talteenottoa kuumaan veteen lämpötila-lämpöteho-käyrästä, joka on esitetty kuvassa 5.4. Pakokaasun kosteuspiitoisuus on 10 %, sisäänmenolämpötila on 400 °C ja poistumislämpötila 40 °C, joka on kastepisteen alapuolella. Tarkastelussa kaikki pakokaasun luovuttama lämpöteho siirretään yhteen jäähdytysvesipiiriin. Jäähdytysveden massavirtaa ja sisääntulolämpötiloja muutetaan siirretyn lämpötehon pysyessä kuitenkin vakiona. Veden massavirta on ilmoitettu pakokaasujen massavirran avulla, ja käyrästä kuvaakin siirrettyä lämpötehoa pakokaasun massavirtayksikköä kohden. Eri jäähdytysvesipiirien alkuarvoina käytetyt massavirrat ja sisäänmenolämpötilat sekä laskennan tuloksina saadut ulostulolämpötilat ja pinch point -lämpötilaerot on kirjattu taulukkoon 5.5.



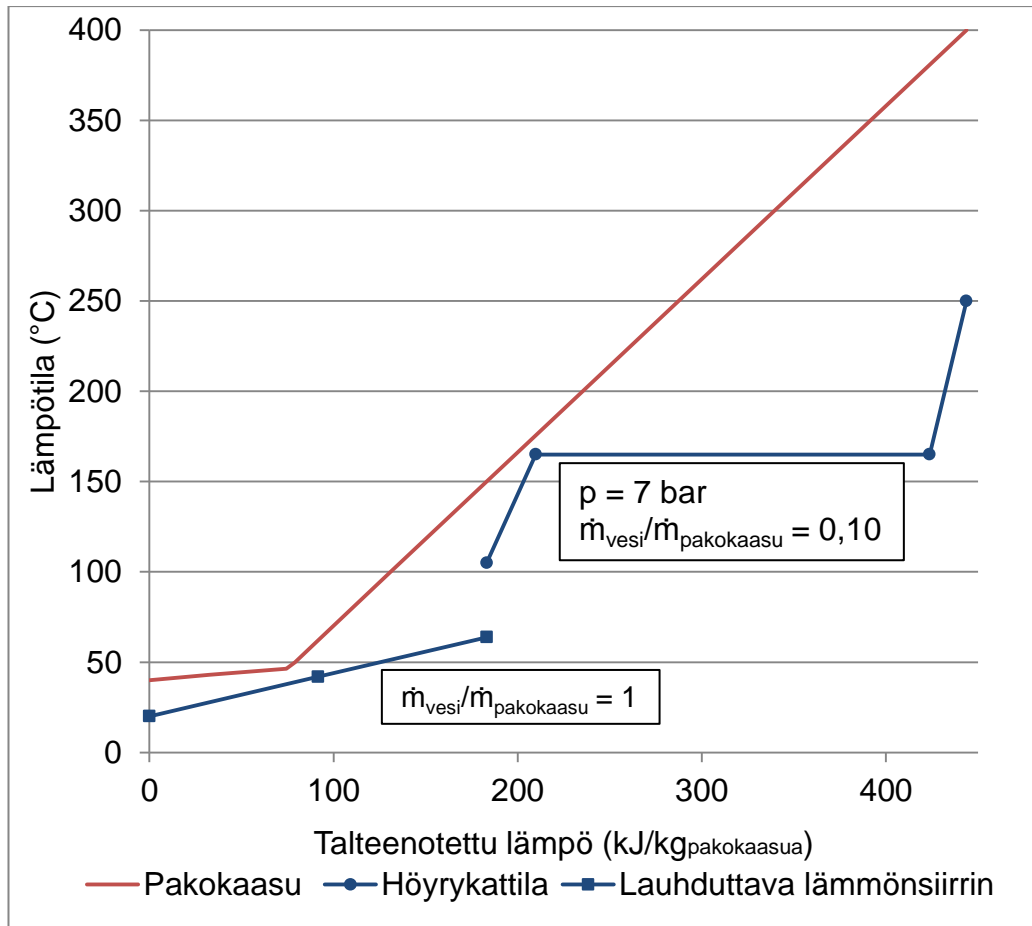
**Kuva 5.4** Pakokaasun tuntevan ja latentin lämmön talteenotto lämpötila-lämpöteho-tasossa eri jäähdytysvesien massavirroilla ja sisääntulolämpötiloilla.

**Taulukko 5.5** Kuvan 5.4 jäähdytysvesipiirien massavirrat ja lämpötilat

	<b>Vesipiiri 1</b>	<b>Vesipiiri 2</b>	<b>Vesipiiri 3</b>	<b>Vesipiiri 4</b>	<b>Vesipiiri 5</b>
$\dot{m}_{\text{vesi}}/\dot{m}_{\text{pakokaasu}}$	1	1,5	2	1	2
$T_{\text{vesi, sisään}} (^{\circ}\text{C})$	15	15	15	20	20
$T_{\text{vesi, ulos}} (^{\circ}\text{C})$	120,7	85,7	68,0	125,6	90,7
Pinch point ( $^{\circ}\text{C}$ )	13,7	19,6	22,5	8,7	14,6
	<b>Vesipiiri 6</b>	<b>Vesipiiri 7</b>	<b>Vesipiiri 8</b>	<b>Vesipiiri 9</b>	
$\dot{m}_{\text{vesi}}/\dot{m}_{\text{pakokaasu}}$	2	2	3	3	
$T_{\text{vesi, sisään}} (^{\circ}\text{C})$	20	30	30	30	
$T_{\text{vesi, ulos}} (^{\circ}\text{C})$	73,0	83,0	72,4	65,4	
Pinch point ( $^{\circ}\text{C}$ )	17,5	7,5	9,3	10,5	

Vaikka kaikkiin kuvan 5.4 jäähdytysvesikäyriin siirtyy yhtä suuri lämpöteho pakokaasuista, lämmönsiirtopinta-alan tarve vaihtelee. Lämmönsiirtopinta-alan tarpeeseen vaikuttaa yhtälön 4.2 mukaan esimerkiksi virtausaineiden lämpötilaero, jolloin suuremmilla lämpötilaeroilla lämmönsiirtopintaa tarvitaan vähemmän. Lämmönläpäisykerroin on myös verrannollinen jäähdytysveden massavirtaan, suurella massavirralla lämmönsiirto on tehokkaampaa ja tarvitaan vähemmän lämmönsiirtopinta-alaa. Kuitenkin alhaisilla veden sisäänmenolämpötiloilla ja suurilla massavirroilla jäädään alhaisiin veden ulostulolämpötiloihin. Lämmönsiirtopintaa tarvitaan vähemmän, mutta samalla saavutettu lämpötilataso on matalampi. Jos veden massavirtaa pienennetään, saadaan loppulämpötilaa nostettua. Tämä näkyy kuvassa kulmakertoimen muutoksena massavirtaa muutettaessa. Pinch point -lämpötilaero rajoittaa massavirran ja loppulämpötilan suhdetta annetulla sisäänmenolämpötilalla.

Havaitaan, että pakokaasujen ja jäähdytysveden väliin jää TQ-kuvaajassa paljon tilaa. Jos kaikki pakokaasuista saatavilla oleva lämpö siirretään kuumaan veteen yhdessä piirissä samalla massavirralla ja painetasolla, lämpötilataso jää paljon höyrykehitystä alhaisemmaksi. Tällöin pakokaasun alhaisen lämpötilatason latentti- ja tuntuvan lämmön talteenotto rajoittavat kuumen pakokaasun lämmöntalteenottoa. Latenttilämpöä näyttäisikin olevan perusteltua ottaa talteen omassa piirissään, jolloin kuumen pakokaasun lämpöenergialla voidaan tuottaa höyryä tai kuumempaa vettä. Tällainen ratkaisu, jossa höyrykattilan jälkeinen lauhduttava lämmönsiirrin on omana jäähdytysvesipiirinään, on esitetty kuvassa 5.6.



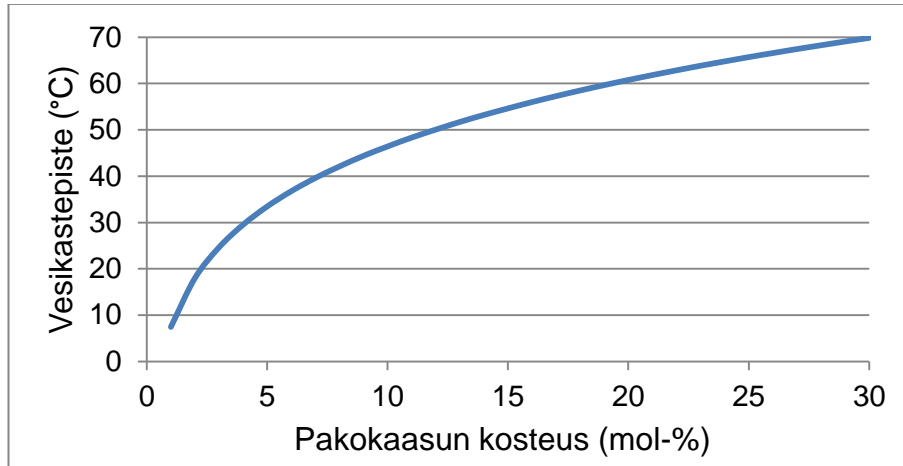
**Kuva 5.6** Erilliset pakokaasun korkean lämpötilan lämmöntalteenottokattila ja lauhduttava lämmönsiirrin lämpötila-lämpöteho-tasossa.

Talteenotettu lämpöteho kuvien 5.4 ja 5.6 tilanteissa on sama, mutta kuumemman lämpötilatason lämmöllä on enemmän käyttökohteita. Sovelluskohteesta kuitenkin riippuu, tarvitaanko kuumaa vettä vai höyryä ja rajoittaako veden massavirta tai sisäänmenolämpötila latenttilämmön talteenottoa eli millainen ratkaisu kuhunkin sovelluskohteeseen on optimaalinen. Pakokaasujen lämmöntalteenottoa vesi-höyrypiiriin korkeilla pakokaasun lämpötiloilla on jo käsitelty luvussa 4.2. Keskitytään tässä luvussa vain matalan lämpötilatason lämmöntalteenottoon sekä lauhduttavan lämmönsiirtimen lämmönsiirtoon olettaen, että korkeammilla lämpötiloilla pakokaasujen tuntuvaa lämpöä on jo otettu talteen.

### 5.2.2 Vesikastepiste

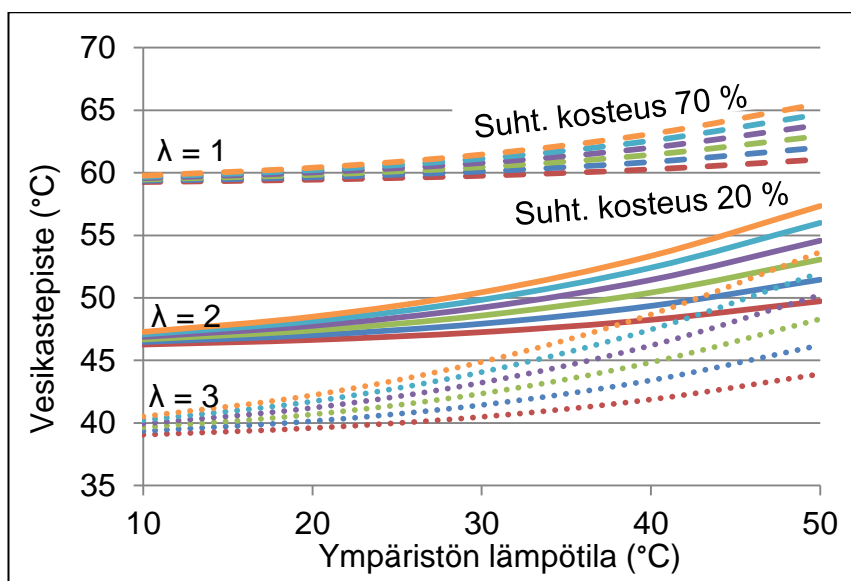
Vesikastepiste on lämpötila, jossa pakokaasut kyllästyvät vesihöyrystä ja vesihöyry alkaa tiivistyä vedeksi. Jotta pakokaasujen lauhdelämpöä voidaan ottaa talteen, tulee pakokaasut jäähdyttää vesikastepisteen alapuolelle. Kastepistelämpötila riippuu pakokaasuissa olevan vesihöyryn osapaineesta kaasussa. Pakokaasujen vesihöyrypitoisuus taas riippuu polttoaineen vetypitoisuudesta, moottorissa käytetystä ilmakertoimesta sekä ympäristön olosuhteista eli polttoilman kosteudesta, lämpötilasta ja paineesta. Vesikas-

teipistelämpötilan riippuvuus pakokaasujen vesihöyrypitoisuudesta on esitetty kuvaajassa 5.7. Vesikastepiste määritetään IAPWS:n vuoden 1997 veden ja höyryn termodynaamisten ominaisuuksien julkaisun kyllästymislämpötilakorrelaatiolla, joka esitetään liitteessä 1 (IAPWS 2007).



**Kuva 5.7** Vesikastepiste pakokaasun kosteuden funktiona, kun ylipainetta on 2 kPa.

Kuvaaja 5.8 esittää olosuhteiden vaikutusta pakokaasujen vesikastepisteeseen. Vesikastepisteen laskennassa on käytetty tyypillistä voimalaitosmaakaasua, jonka koostumus on esitetty taulukossa 5.1. Laskenta perustuu savukaasuanalyysiin, josta saadaan pakokaasujen kosteus ja siten veden osapaine pakokaasuissa kyseisissä tilanteissa. Kun vesihöyryn osapaine pakokaasuissa tiedetään, voidaan kastepistelämpötila määrittää. Kuvaajasta nähdään pakokaasujen vesikastepiste polton ilmakertoimilla 1, 2 ja 3 ulkoilman olosuhteiden vaihdellessa 10–50 °C lämpötilassa ja 20–70 % suhteellisella kosteudella.



**Kuva 5.8** Ilmakertoimen, ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutus pakokaasujen vesikastepisteeseen. Pakokaasu on 2 kPa:n ylipaineessa.

Vesikastepistekuvaajasta havaitaan, että pakokaasujen vesikastepiste on noin välillä 40–65 °C riippuen polton ilmakertoimesta, polttoilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Moottorin ilmakertoimen kasvu vaikuttaa pakokaasujen kosteuspitoisuuden laskuun ja siten alentaa vesikastepistettä veden osapaineen pienentyessä pakokaasuissa. Kuvaajasta havaitaan myös, että suhteellisen kosteuden tai lämpötilan kasvu polttoilmassa nostaa kastepistelämpötilaa, sillä polttoilmaan sitoutuneen ja täten pakokaasuihin päätyneen vesihöyryn määrä kasvaa näiden myötä. Suhteellisen kosteuden vaikutus vesikastepisteeseen kasvaa ilman lämpötilan myötä, matalissa lämpötiloissa suhteellisen kosteuden vaikutus on pienempi kuin korkeissa lämpötiloissa. Vaikka ympäristön lämpötilan kasvaessa savukaasujen kosteuspitoisuus ja kastepiste nousevat ja samalla latenttilämmön talteenoton potentiaali kasvaa, matalalämpötilaisella jätelämmöllä voidaan olettaa olevan vähemmän käyttökohteita lämpimässä ympäristössä eli latenttilämmön talteenoton tarve pienenee, vaikka potentiaali kasvaa.

Ympäristön vaikutus korostuu suurilla ilmakertoimilla. Kun stökiometrisellä ilmakertoimella vesikastepisteen vaihteluväli on vain 6 astetta, on se 15 astetta ilmakertoimella 3. Laihaseoskaasumoottoreiden ilmakerroin on luokkaa 2–2,2. Maakaasun koostumus, erityisesti hiilivetypitoisuus, vaikuttaa myös pakokaasujen vesihöyryn määrään ja sitä kautta vesikastepisteeseen. Eri maakaasuille tehdyissä vastaavissa laskelmissa havaitaan, että vesikastepiste muuttuu noin 0,3–0,5 astetta polttoaineen erilaisesta koostumuksesta johtuen. Erilaisten maakaasupolttoaineiden vaikutukset vesikastepisteeseen ovat kuitenkin vähäisempiä kuin polttoilman ja ilmakertoimen vaikutukset.

Vesikastepisteen nosto on kiinnostavaa, sillä mitä korkeampi vesikastepiste on, sitä vähemmän savukaasuja tarvitsee jäähdyttää ennen lauhdelämmön talteenoton aluetta. Myös jäähdytysvesipiiriä voidaan käyttää korkeammilla lämpötilatasoilla, jolloin talteenotetun lämmön hyötykäyttökohteita löytyy enemmän. Kastepistettä voidaan nostaa kostuttamalla pakokaasuja ruiskuttamalla niihin vettä tai höyryä ennen lauhduttavaa lämmönsiirrintä, jolloin veden osapaine pakokaasuissa nousee. Ruiskutettaessa vettä pakokaasuihin, pakokaasut lämmittävät ja höyrystävät syötetyn veden ja pakokaasujen lämpötila alenee. Samalla kastepiste nousee, sillä vesihöyryn osapaine lämmönsiirtimessä kasvaa. Täten pakokaasujen kyllästämiseen tarvittava ruiskutusveden määrä on riippuvainen ruiskutuksen jälkeisestä kastepistelämpötilasta ja toisinpäin seuraavien yhtälöiden (5.1–5.3) mukaan, joita iteroimalla lämpötila ja ruiskutusveden tarve voidaan määrittää. Yhtälössä 5.1 pakokaasujen jäähtyessä luovuttama lämpöteho asetetaan yhtä suureksi kuin ruiskutusveden lämmittämisen ja höyrystämisen vaatima lämpöteho.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{sk} c_{p,pk} (T_{sk,ennen} - T_{uusi\ kastepiste}) \\ = \dot{m}_{lisävesi} (c_{p,v} (T_{uusi\ kastepiste} - T_{lisävesi,ennen}) + l(T_{uusi\ kastepiste})) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Kastepiste määräytyy vesihöyryn osapaineen kyllästymislämpötilasta, vesihöyryn osapaine taas pakokaasujen paineen ja vesihöyryn mooliosuuden mukaan.

$$T_{uusi\ kastepiste} = T_{kyl}(p_{vesihöyry}) \quad (5.2)$$

$$p_{vesihöyry} = x_{vesihöyry} p_{pk} = (x_{vesihöyry, ennen} + \frac{\dot{m}_{lisävesi}}{\dot{m}_{pk}} \frac{M_{pk}}{M_{vesi}}) p_{pk} \quad (5.3)$$

Huomionarvoista on se, että laskettu uusi kastepiste on samalla kostutettujen pakokaasujen lämpötila vesiruisutuksen jälkeen, sillä ruiskutuksessa pakokaasut kyllästetään vesihöyryllä. Vaikka kastepistettä saadaankin vesiruisutuksella nostettua, täytyy huomata, että talteenotettavan lämmön määrä ei kasva, sillä ruiskutetun veden höyrystyminen sitoo pakokaasujen lämpöenergiaa yhtä paljon kuin sen lauhtuminen vapauttaa. Näin ollen kastepistettä ja lauhduttavan lämmönsiirtimen loppulämpötilaa voidaan kostuttamalla nostaa, mutta vasta alkuperäisen kastepisteen alapuolella latenttilämmön talteenotto ylittää ruiskutusveden lämmöntarpeen. Vesihöyrypitoisuuden ohella myös korkeampi savukaasujen paine nostaa kastepistelämpötilaa. Tyypilliset muutaman kilopascalin ylipaineet lämmöntalteenottokattiloissa nostavat kastepistelämpötilaa hieman, kuitenkin alle 1 °C.

### 5.3 Lauhtuminen ja lämmönsiirto pakokaasujen lämmöntalteenotossa

Energiatehokkuuden ja polttoaineen energian mahdollisimman tarkan hyötykäytön lisääntyessä myös kiinnostus latenttilämmön talteenottoon on lisääntynyt. Viime vuosina on tehty useita tutkimuksia, jotka käsittelevät erilaisten savukaasujen yhteydessä kondensoivia lämmönsiirtimiä, niiden lämmönsiirron tai lauhtumisen mallintamista sekä happo- ja vesikastepisteen alapuolella toimivien lämmönsiirrinten korroosiota ja materiaalivalintoja. Osakabe (2000) tutki lauhdelämmön talteenottoa raskaan polttoöljyn happipolton savukaasuista. Tutkimuksessaan Osakabe loi analyttisen mallin lauhdelämmön talteenotolle sekä lauhtumiselle ja testasi malliaan käytännössä havaiten mallin toimivuuden. Shi et al. (2011) tutkivat kompaktin ripaputkilämmönsiirtimen suorituskykyä kaasuturbiinin savukaasujen latenttilämmön talteenotossa. Shi et al. muodostivat korrelaation yhdistetylle konvektiolle ja lauhtumiselle sekä tutkivat savukaasujen painehäviötä lämmönsiirtimessä. Jeong et al. (2010) sekä Levy et al. (2011) tutkivat fossiilisten polttoaineiden voimalaitosten savukaasujen vesihöyryn lauhtumista kondensoivissa lämmönsiirtimissä, painopisteenään lauhtumisnopeus ja -tehokkuus sekä lauhdeveden talteenotto. Levy et al. tutkivat lisäksi materiaalien korroosiota happo- ja vesikastepisteen alapuolella, lauhdeveden käsittelyä sekä kondensoivan lämmönsiirtimen kannattavuutta. Chen et al. (2010 ja 2012) tutkivat lauhdelämmön talteenotto-sovelluksia prosessiteollisuudessa käyttäen esitietoina olemassa olevan biomassakattilalaitoksen ja kaukolämpöverkon ominaisarvoja. Chen et al. tekivät laitoksen arvoilla lämpöteknisen mitoituksen vaippa-putki-tyyppiselle lauhduttavalle lämmönsiirtimelle sekä arvioivat sen kustannuksia ja kannattavuutta. Seuraavaan taulukkoon on kirjattu tarkasteltujen tutkimusten sovelluskohteet ja lämmönsiirrinratkaisut.

**Taulukko 5.9** Lauhdelämmön talteenoton tutkimusten sovelluskohteet ja lämmönsiirrinratkaisut

Tutkimus	Sovelluskohde	Polttoaine	Putkityyppi	Putkijärjestys
Chen et al. 2010 ja 2012	kattilan savukaasut	biomassa	sileä putki	porrastettu
Jeong et al. 2010	kattilan savukaasut	hiili	sileä putki	linjassa
Levy et al. 2011	kattilan savukaasut	hiili, maakaasu	sileä putki	linjassa
Osakabe 2000	kattilan savukaasut	raskas polttoöljy	sileä putki	porrastettu
Osakabe et al. 2001	kattilan savukaasut	maakaasu	sileä putki	linjassa
Shi et al. 2011	kaasuturbiinin savukaasut	maakaasu	ripaputki	porrastettu

### 5.3.1 Lauhtuminen kondensoivassa lämmönsiirtimessä

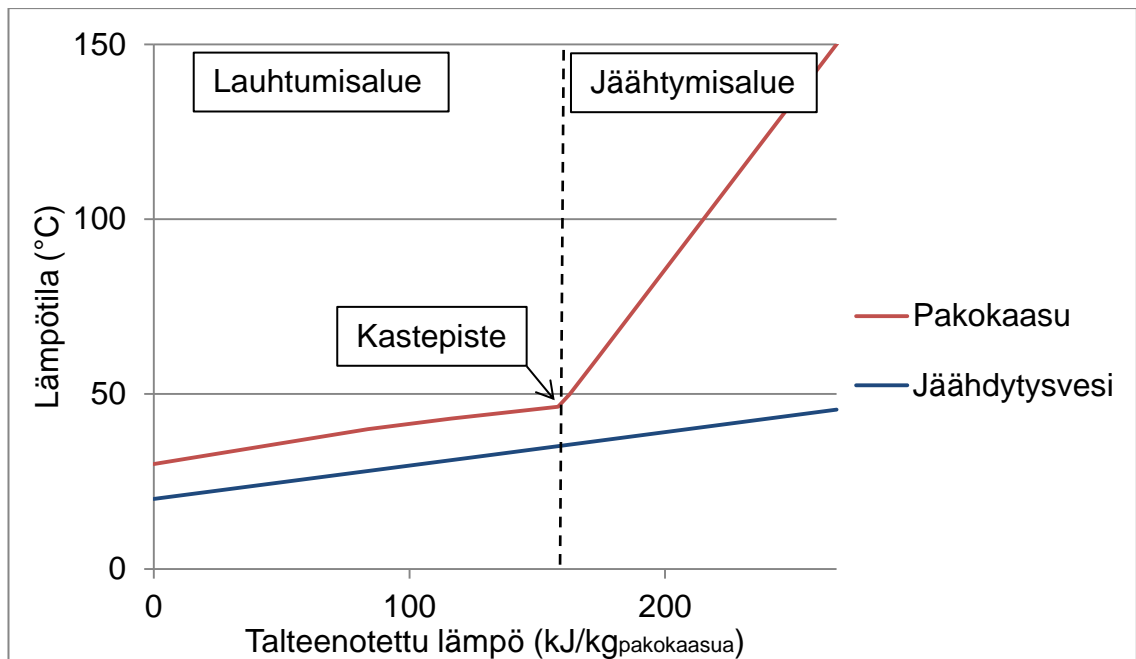
Lämmönsiirtoprosessi pakokaasujen lauhdelämmön talteenoton alueella tapahtuu pakotetun konvektion ja osittaisen vesihöyryn lauhtumisen mekanismein. Lauhtumisen ja tuntevan lämmön konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet ovat samaa kertaluokkaa, lauhtuminen lisää lämmönläpäisykerrointa 1–4-kertaiseksi pelkkään tuntevan lämmön konvektiiviseen lämmönläpäisykertoimeen nähden. Kun putken ulkopinnan lämpötila laskee alle paikallisen kastepistelämpötilan, pinnan läheisyydessä kaasun lämpötila laskee kastepisteen alapuolelle ja kaasun vesihöyry alkaa lauhtua putken pinnalle. Lauhtuessaan vesihöyry luovuttaa latenttilämpöä. (Shi et al. 2011)

Lauhtumista lämmönsiirtopinnoille voi tapahtua pisaralauhtumisen tai kalvolauhtumisen keinoin. Jos lauhde kastelee pystysuoran pinnan ja pinta peittyy lauhdekalvolla, jonka paksuus kasvaa lauhteen valuessa pintaa alas painovoiman vaikutuksesta, kyseessä on kalvolauhtuminen. Faasinmuutosentalpian luovutus tapahtuu kalvon yli, jolloin lauhdekalvo muodostaa vastuksen lämmönsiirrolle. Lauhdekalvot ovat hyvin ohuita, minkä vuoksi niiden aiheuttamat lämpövastukset ovat hyvin pieniä ja lämmönsiirtokertoimet puolestaan suuria. Jos lauhtumisnopeus on alhainen esimerkiksi pienen lämpötilaeron vuoksi, lauhdekerros on tasainen ja virtaa pitkin lämmönsiirtopintaa laminaaristi. Suuremmilla lauhtumisnopeuksilla lauhdevirtaus voi olla aaltoilevaa laminaarista tai turbulenttia. Jos lämmönsiirtopinta on likainen tai käsitelty kostumista estävällä aineella, lauhde ei kastele lämmönsiirtopintaa vaan pinnan epätasaisuuksiin muodostuu lauhdepisaroita, jotka kasvavat suoran lauhtumisen ja pisaroiden yhteenkasvamisen myötä. Kun pisarat kasvavat tarpeeksi suuriksi, ne valuvat pintaa alas ja muodostavat lisää tiivistymiskeskuksia. Tätä lauhtumisen muotoa kutsutaan pisaralauhtumiseksi. Lämmönsiirrosta suurin osa tapahtuu halkaisijaltaan alle 100 µm kokoisten pisa-



roiden läpi, joiden lämmönsiirtokerroin on hyvin suuri. Pisaralauhtuminen onkin houkutteleva juuri sen korkean lämmönsiirtokertoimen vuoksi ja sitä on pyritty edistämään kehittämällä kastumista ehkäiseviä lämmönsiirtomateriaaleja ja pinnoitteita. Esimerkiksi Teflon-pinnoitteen lisääminen pisaralauhtumisen edistämiseksi on kuitenkin kallista ja lisäksi se kasvattaa pinnan lämpövastusta. Kun lauhdutin otetaan käyttöön, lauhtuminen tapahtuu pisaroina, mutta tuntien tai päivien kuluessa muodostuu lauhdekalvo, ja kondensoituminen on kokonaan kalvolauhtumista. Hyvänä ohjeena pidetäänkin kalvolauhtumisen olettamista suunnittelussa, jotta lämmönläpäsiykertoimet arvioidaan maltillisesti. Osakabe et al. (2001) havaitsivat lauhduttavassa lämmönsiirtimessä lauhtumisen tapahtuvan pisaralauhtumisen keinoin vesikastepisteen läheisyydessä, mutta alemmilla lämpötiloilla kalvolauhtumisen keinoin. Rajoitutaan tässä työssä vain kalvolauhtumisen tarkasteluun. (Mills 1999, s.571–572)

Matalan lämpötilatason jätelämpökattilassa, jossa tapahtuu myös lauhtumista, on kuiva ja märkä alue, pakokaasujen jäähtymisen alue ja lauhtumisen alue. Nämä voidaan havaita savukaasulauhduksen lämpötila-entalpianmuutos-kuvaajasta kuvassa 5.10. Laskennassa pakokaasujen kosteuspitoisuutena on käytetty 12 mol-% ja oletettu, että jäähdytysveden massavirta on kaksinkertainen pakokaasun massavirtaan nähden.



**Kuva 5.10** Lauhduttavan lämmönsiirtimen TQ-kuvaaja

Kuvasta voidaan havaita pakokaasujen jäähtymisen eli vesihöyryn tulistuksen poiston alue, jolloin pakokaasujen luovuttama energia on lineaarisesti riippuvaista lämpötilasta, sekä vesihöyryn lauhtumisen alue, jolloin pakokaasut jäähtyvät vesikastepisteen alapuolella ja pakokaasujen vesihöyry lauhtuu. Jäähdytysvesi lämpenee lineaarisesti koko lämmönsiirtimen alueella. Jos lauhduttavaa lämmönsiirrintä edeltää pakokaasujen kostutus, pakokaasujen jäähtymisen alue puuttuu. Korkeamman lämpötilatason lämmöntalteenoton TQ-kuvaaja on esitetty luvussa 4.2 sekä kuvassa 5.6 ja se edeltää

lauhduttavaa lämmönsiirrintä. Pakokaasujen jäähtymisen alueella lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa konvektiivisesti, perinteisen pakokaasujen lämmöntalteenoton periaatteiden mukaan, joten keskitytään seuraavassa vain lämmönsiirtimen lauhduttavaan alueeseen ja lämmönsiirtomallin luomiseen siinä.

### 5.3.2 Lämmön- ja massansiirron laskentamalli lauhduttavassa lämmönsiirtimessä

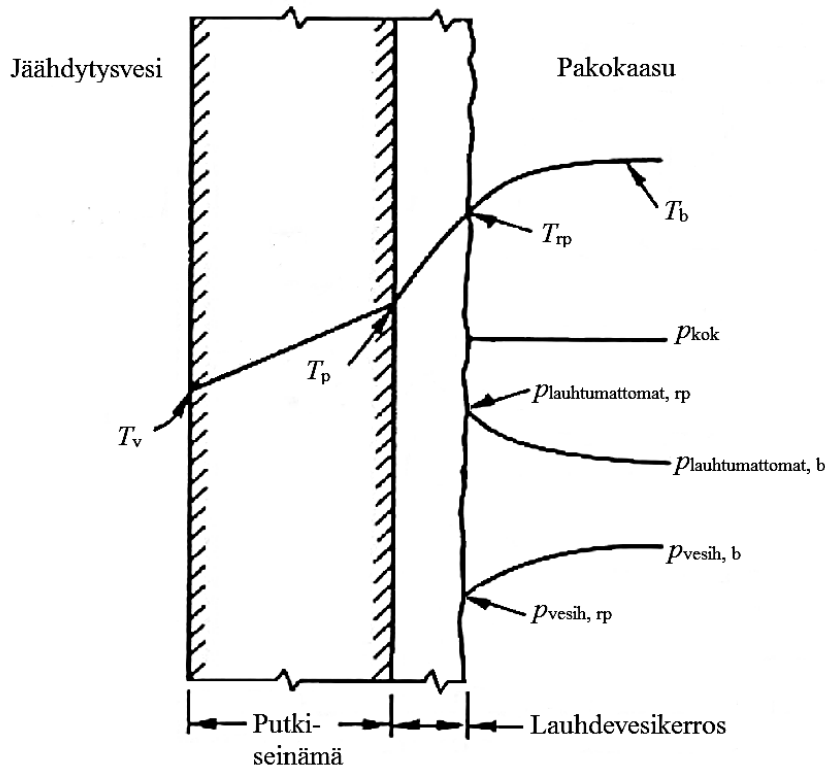
Luodaan seuraavaksi analyttinen malli, jolla voidaan arvioida lämmönsiirtoa pakokaasusta jäähtytysveteen ja pakokaasun kosteuden lauhtumista putkipinnoille. Tarkastellaan vastavirta- ja ristivirtausperiaatteella toimivaa putkilämmönsiirrintä, jossa jäähtytysvesi virtaa putkien sisällä ja pakokaasu putkipakettien ulkopuolella. Lämmön- ja massansiirtoa kosteasta savukaasusta lauhdevesikerrokseen ja edelleen jäähtytysveteen voidaan mallintaa lämmön- ja massansiirron analogiamalleilla.

Vesihöyryn siirtyminen lauhduttavalle pinnalle tapahtuu massansiirron keinoin. Lämmönsiirto ja massansiirto ovat toisilleen analogiset; lämpö siirtyy lämpötilaeron yli kuumemmasta kylmempään siirtäen energiaa, massa siirtyy konsentraatioeron yli suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Massa voi siirtyä eri mekanismein, kuten lämpökin. Pakokaasujen vesihöyryn siirtymisessä bulkkivirrasta lauhduttavan pinnan läheisyyteen on kyse diffuusiosta. Jäähdytetyn pinnan läheisyydessä pakokaasujen vesihöyry lauhtuu vedeksi, kun pinta jäähdyttää pakokaasut kastepisteen alapuolelle. Samalla kaasun vesihöyrypitoisuus alenee ja syntyy konsentraatioero bulkkivirran ja pinnan välille. Konsentraatioeron vuoksi vesihöyry alkaa diffundoitua negatiivisen konsentraatiogradientin suuntaan eli kohti pienempää pitoisuutta. Pitoisuutta voidaan kuvata massakonsentraationa, kaasussa komponentin osatiheytenä  $\rho_i$ , joka ideaalikaasun tilanyhtälön mukaan on

$$\rho_i = \frac{p_i M_i}{R_u T_i}. \quad (5.4)$$

Lauhduttavassa lämmönsiirtimessä oleellista ja samalla haastavaa on lämmön- ja massansiirron samanaikaisuus. Ilman lämpötilaeroja lämmönsiirtoa ja lauhtumista ei tapahtuisi, jolloin ei syntyisi myöskään vesihöyryn pitoisuuseroja eikä massansiirtoa voisi tapahtua. Jäähdytetty pinta eli lämmönsiirto pakokaasuista jäähtytysveteen mahdollistaa kaasun kyllästymisen vesihöyrystä ja vesihöyryn lauhtumisen. Lauhtuminen puolestaan aiheuttaa pitoisuuseron kaasuun, jolloin vesihöyryä siirtyy kaasuvirtauksen poikki lauhduttavalle pinnalle ja lauhtuminen voi jatkua. Kuvassa 5.11 on esitetty osittaisen pakokaasun lauhtumisen lämpötilaprofiili sekä vesihöyryn ja muiden, lauhtumattomien pakokaasukomponenttien osapaineet. Vesihöyryn osapaineen ja täten massakonsentraation lasku pakokaasun bulkkivirrasta lauhdekalvon pinnalle siirryttäessä aiheuttaa diffuusion. Lauhtumattomien komponenttien osapaine kasvaa lauhdekalvon pintaa lähestyttäessä, mikä aiheuttaa vesihöyryn diffuusiolle vastusta ja heikentää lauhtumista. Pakokaasujen vesihöyryn lauhtumisen oletetaan tässä tapahtuvan kalvolauhtumisen keinoin, jolloin höyry lauhtuu putken pinnalle muodostaen lauhdevesikalvon. Kalvon pin-

nalla vallitsee termodynaaminen tasapaino eli vesihöyrypitoisuus kaasussa on kyllästymispisteessä. Vesihöyryn osapaine kalvon pinnalla on tällöin kylläisen veden paine kyseisessä lämpötilassa. Kylläisen veden osapaine saadaan IAPWS:n kyllästyspainekorrelaatiosta, joka on esitetty liitteessä 1. Vesihöyryn osapaine pakokaasuvirrassa saadaan selville savukaasuanalyysin avulla.



**Kuva 5.11** Lämpötilajakauma ja pakokaasukomponenttien osapaineet pakokaasun osittaisen lauhtumisen yhteydessä. Muokattu lähteestä (Chen et al. 2010)

Osittaisessa kaasun lauhtumisessa konvektiivinen lämmönsiirto koostuu tuntu- van lämmön ja latentin lämmön lämpövirroista. Jäähdyttävään aineeseen siirtyy putken läpi johtumalla lämpövirta, joka on edellisten summa. Tilannetta kuvaa yhtälö

$$q_{\text{lauhdekalvosta jäähdytysveteen}} = q_{\text{kaasusta lauhdekalvolle}} \quad (5.5)$$

Lämmönsiirto kaasusta lauhdekalvon pinnalle jakautuu konvektiivisesti siirtyviin läm- pövirtatermeihin sekä säteilylämmönsiirtoon:

$$q_{\text{kaasusta lauhdekalvolle}} = q_{\text{konvektio}} + q_{\text{säteily}} \quad (5.6)$$

Säteily pakokaasusta on kuitenkin hyvin vähäistä, sillä lämpötilaero on pieni, ja se voi- daan hyvällä tarkkuudella jättää huomioimatta. Kaasusta konvektiolla siirtyvät lämpö- virrat voidaan edelleen kirjoittaa tuntu- van ja latentin lämpövirran summana:

$$q_{\text{konvektio}} = q_{\text{tuntuva lämpö}} + q_{\text{latentti lämpö}} \quad (5.7)$$

jossa tuntuva lämpövirta saadaan konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen ja lämpötila- eron tulona. Lämpötilaero, jonka yli kaasun tuntuva lämpö siirtyy, on kaasun bulkkivir-

ran ja kaasun ja lauhdekalvon rajapinnan lämpötilojen erotus. Latentti lämpövirta taas määräytyy lauhtuvan veden massavirran ja faasinmuutoksen ominaisentalpian tulona. Näin ollen kaasusta lauhdekalvon pintaan siirtyvä lämpövirta voidaan kirjoittaa

$$q_{\text{kaasusta lauhdekalvolle}} = h_{\text{u,konv}}(T_b - T_{\text{rp}}) + \frac{\dot{m}_{\text{lauhde}}}{A} l \quad . \quad (5.8)$$

Sillä lämmön- ja massansiirtoa kosteasta savukaasusta lauhdevesikerrokseen ja putken pinnalle voidaan mallintaa lämmön- ja massansiirron analogiamalleilla, määritellään lauhtumiselle lämmönsiirtokerroin  $h_{\text{lauht}}$  vastaavasti kuin tuntuvan lämmön konvektiivinen lämmönsiirtokerroin on määritelty. Latentti lämpövirta voidaan täten kirjoittaa lauhtumisen lämmönsiirtokertoimen ja lämpötilaeron tulona,

$$q_{\text{latentti lämpö}} = h_{\text{lauht}}(T_b - T_{\text{rp}}) \quad . \quad (5.9)$$

Nyt lämpövirtaa pakokaasusta lauhdekalvon pinnalle voidaan kuvata lämmönsiirtoker toimien avulla seuraavasti:

$$q_{\text{kaasusta lauhdekalvolle}} = (h_{\text{u,konv}} + h_{\text{lauht}})(T_b - T_{\text{rp}}) \quad . \quad (5.10)$$

Tarkastellaan seuraavaksi pakokaasujen pakotetun konvektion lämmönsiirtoker rointa  $h_{\text{u,konv}}$ . Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin putken ohi virtaavalle pakokaasulle voidaan määrittää Nusseltin luvun avulla seuraavasti:

$$h_{\text{u,konv}} = \frac{Nu_{\text{pk}} \lambda_{\text{pk}}}{d_{\text{u}}} \quad . \quad (5.11)$$

Ulkopuolista virtausta sileiden putkipakettien yli voidaan kuvata erilaisilla Nusseltin luvun korrelaatioilla. Keskimääräistä Nusseltin lukua sileiden putkien muodostamalle putkipaketille, jossa putkirivit ovat linjassa ja putkien pituussuuntainen välitys on yhtä suuri kuin poikittaissuuntainen välitys (neliöasetelma), voidaan Raikon ja Saarenpään (2010) mukaan kuvata korrelaatiolla

$$Nu_{\text{pk}} = 1,13 C_1 Re_{\text{d,max}}^{m_1} Pr_{\text{pk,b}}^{1/3} \quad , \quad (5.12)$$

jonka kertoimet  $C_1$  ja  $m_1$  valitaan taulukosta 5.11. Reunaehtoina tulee putkiriviä olla vähintään 10, Reynoldsin luvun välillä 2 000–40 000 ja Prandtin luvun vähintään 0,7.

**Taulukko 5.11** Nusseltin korrelaation (5.12) kertoimet  $C_1$  ja  $m_1$  eri putkiväleillä  $p$ .

$p/d_{\text{u}}$	<b>1,25</b>	<b>1,5</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
$C_1$	0,348	0,250	0,229	0,286
$m_1$	0,592	0,620	0,632	0,608

Zukauskas on Raikon ja Saarenpään (2010) mukaan esittänyt vastaavalle tilanteelle keskimääräisen Nusseltin luvun korrelaation, joka poikkeaa hieman edellisestä. Zukauskasin korrelaatioissa reunaehtoina on vähintään 20 putkiriviä, Prandtin luku välillä 0,7–500 ja Reynoldsin luku välillä 1 000– $2 \cdot 10^6$ . Korrelaatio Nusseltin luvulle on

$$Nu_{\text{pk}} = C_2 Re_{\text{d,max}}^{m_2} Pr_{\text{pk,b}}^{0,36} \left( \frac{Pr_{\text{pk,b}}}{Pr_{\text{pk,pp}}} \right)^{1/4} \quad , \quad (5.13)$$

jonka kertoimet  $C_2$  ja  $m_2$  saadaan Reynoldsin luvun mukaan taulukosta 5.12.

**Taulukko 5.12** Nusseltin korrelaation (5.13) kertoimet  $C_2$  ja  $m_2$  eri Reynoldsin luvuilla.

$Re_{d,\max}$	100	1000	200000	2000000
$C_2$	0,80	0,26	0,27	0,02
$m_2$	0,40	0,60	0,63	0,84

Lämmönsiirtokertoimen arvo riippuu käytetystä Nusseltin luvun korrelaatiosta. Pakokaasuvirran Reynoldsin ja Prandtlin luvut saadaan seuraavien yhtälöiden avulla:

$$Re_{d,\max} = \frac{u_{pk,\max} d_u}{\nu_{pk}} \quad \text{ja} \quad (5.14)$$

$$Pr_{pk} = \frac{\nu_{pk}}{\alpha_{pk}} . \quad (5.15)$$

Yhtälöissä kaasun ominaisuuksia kuvaavat lämmönjohtavuus  $\lambda$ , lämmön diffusiviteetti  $\alpha$  sekä kinemaattinen viskositeetti  $\nu$ . Virtausta kuvaa nopeus  $u$  ja lämmönsiirtä putken ulkohalkaisija  $d_u$ .

Tarkastellaan seuraavaksi lauhtumisen lämmönsiirtokerrointa  $h_{lauht}$ . Yhdistämällä yhtälöt 5.8 ja 5.9 saadaan lauhtumisen lämmönsiirtokerroin seuraavanlaiseksi:

$$h_{lauht} = \frac{\dot{m}_{lauhde} l}{A(T_b - T_{rp})} . \quad (5.16)$$

Lauhtumisen lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen tarvittavan lauhtuvan veden massavirta voidaan selvittää lauhtumista kuvaavasta yhtälöstä 5.17

$$\frac{\dot{m}_{lauhde}}{A} = g_m \left( \frac{\rho_{vesih,b}}{\rho_{pk,b}} - \frac{\rho_{vesih,kalvo}}{\rho_{pk,kalvo}} \right) , \quad (5.17)$$

jossa  $g_m$  on massansiirtokerroin ja tiheystermit kuvaavat suhteellisia vesihöyryn massaosuuksia pakokaasun bulkkivirrassa ja lauhdekalvon pinnalla. Osatiheyksien erotus kuvaa pitoisuuseroa, jonka yli diffuusio tapahtuu. Vesihöyryn osatiheydet voidaan selvittää yhtälön 5.4 mukaan. Massansiirtokerroin  $g_m$  saadaan laskettua massansiirtotilannetta kuvaavien Sherwoodin luvun ja putken ulkohalkaisijan sekä vesihöyry-pakokaasuseosta kuvaavan diffuusiokertoimen ja tiheyden avulla seuraavasti:

$$g_m = \frac{\rho_{pk} \mathcal{D}_{vesih,pk}}{d_u} Sh . \quad (5.18)$$

Vesihöyryn diffusiokerrointa pakokaasussa voidaan Osakabe et al. (2001) mukaan arvioida vesihöyryn diffusiokertoimenä ilmassa, joka taas määräytyy lämpötilan funktiona seuraavan korrelaation mukaisesti.

$$\mathcal{D}_{vesih,ilma} = 7,65 * 10^{-5} \frac{T^{11/6}}{P} , \quad (5.19)$$

jossa lämpötila ilmoitetaan kelvineinä ja paine pascaleina. Massan diffuusiokerroin korreloi vahvasti lämmön diffusiviteetin  $\alpha$  kanssa, jolloin vesihöyryn diffuusiokerroin pakokaasuissa voidaan tarkemmin määritellä yhtälön

$$\mathcal{D}_{\text{vesih,pk}} = \mathcal{D}_{\text{vesih,ilma}} \frac{\alpha_{\text{pk}}}{\alpha_{\text{ilma}}} \quad (5.20)$$

avulla. Sherwoodin lukua voidaan arvioida korrelaatioilla vastaavasti kuin Nusseltin lukua. Analogisessa lämmön- ja massansiirron tilanteessa Sherwoodin korrelaatio saadaan tilannetta kuvaavasta Nusseltin korrelaatiosta, jossa Prandtin luku korvataan Schmidtin luvulla (Osakabe et al. 2001; Shi et al. 2011). Täten Sherwoodin luku voidaan kirjoittaa yhtälön 5.12 mukaan seuraavasti:

$$Sh_{\text{pk}} = 1,13 C_1 Re_{\text{pk}}^{m_1} Sc_{\text{pk}}^{1/3} . \quad (5.21)$$

Vesihöyry-pakokaasuseosta kuvaavan Schmidtin luku  $Sc_{\text{pk}}$  on kinemaattisen viskositeetin  $\nu_{\text{pk}}$  ja difuusiokertoimen  $\mathcal{D}_{\text{pk}}$  osamäärä eli

$$Sc_{\text{pk}} = \frac{\nu_{\text{pk}}}{\mathcal{D}_{\text{pk}}} . \quad (5.22)$$

Lämmönsiirtoa lauhdekalvosta putken pintaan kuvaa yhtälö

$$q_{\text{lauhdekalvosta putkeen}} = h_{\text{kalvo}}(T_{\text{rp}} - T_{\text{pp}}) , \quad (5.23)$$

jossa  $h_{\text{kalvo}}$  on lauhdekalvon lämmönsiirtokerroin putken pinnalle ja  $T_{\text{pp}}$  kuvaa putken pintalämpötilaa. Lämpövirta kosteista savukaasuista putken pinnalle on siis

$$q_{\text{kaasusta putkeen}} = h_{\text{kok}}(T_{\text{b}} - T_{\text{pp}}) , \quad (5.24)$$

jonka kokonaislämmönsiirtotermi  $h_{\text{kok}}$  voidaan yhtälöiden 5.10 ja 5.23 mukaan kirjoittaa seuraavasti:

$$h_{\text{kok}} = \left[ \frac{1}{h_{\text{kalvo}}} + \frac{1}{h_{\text{u,konv}} + h_{\text{lauht}}} \right]^{-1} . \quad (5.25)$$

Lauhdekalvon lämmönsiirtokerroin  $h_{\text{kalvo}}$  voidaan laskea kalvon paksuuden ja lauhteen lämmönjohtavuuden sekä korjauskertoimen avulla. Lauhdekalvo on kuitenkin hyvin ohut, alle 0,2 mm luokkaa, kun lauhtumattomien kaasujen osuus savukaasuista on yli 80 %. Termi  $h_{\text{kalvo}}$  on kääntäen verrannollinen kalvon paksuuteen ja kasvaa siksi ohuilla kalvoilla suureksi, minkä vuoksi sen vaikutus kokonaislämmönsiirtokertoimeen on hyvin pieni. Lämpötilaero lauhdekerroksen yli on alle 2,5 °C, ja onkin havaittu, että lauhdevesikalvon vaikutus lämmönsiirtymiseen voidaan jättää laskennassa huomiotta aiheuttamatta merkittävää virhettä. (Shi et al. 2011, Mills 1999, Osakabe et al. 2001, Raiko & Saarenpää 2010) Näin ollen voidaan arvioida kokonaislämmönsiirtokerrointa kosteista pakokaasuista putken pinnalle seuraavasti:

$$h_{\text{kok}} = h_{\text{u,konv}} + h_{\text{lauht}} . \quad (5.26)$$

Edellä kuvattujen yhtälöiden 5.6–5.26 avulla voidaan laskea pakokaasuvirrasta lämmönsiirtimen pinnalle siirtyvä lämpövirta, joka aiheutuu vesihöyryn latenttilämmön ja pakokaasujen tuntevan lämmön siirtymisestä. Tarkastellaan seuraavaksi lämmönsiirtoa putken yli sekä jäähdytysveteen.

Putken lämpövastus  $R_{\text{p}}$  voidaan laskea yhtälöstä

$$R_p = \frac{\ln(d_u/d_s)}{2\pi L \lambda_p} \quad , \quad (5.27)$$

jossa  $d_u$  ja  $d_s$  ovat putken ulko- ja sisähalkaisijat,  $L$  putken pituus ja  $\lambda_p$  on putkimateriaalin lämmönjohtumiskerroin. Yhtälö 5.27 esittää lämpövastuksen puhtaalle putkelle, ulko- ja sisäpuolen likaantuminen voidaan ottaa huomioon lämpövastuksen laskennassa omina vastaavina termeinä likakerrosten paksuuksien ja lämmönjohtavuuksien avulla. Jäähdytysveden lämpövastus  $R_v$  taas määritellään yhtälöllä

$$R_v = \frac{1}{\pi L \lambda_v Nu_v} \quad , \quad (5.28)$$

missä  $\lambda_v$  on jäähdytysveden lämmönjohtumiskerroin ja  $Nu_v$  on jäähdytysvesivirtaa kuvaava Nusseltin luku. Nusseltin luku putken sisäpuolisessa virtauksessa määritellään konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen  $h_{s,konv}$ , putken sisähalkaisijan ja virtaavan aineen lämmönjohtavuuden avulla seuraavasti:

$$Nu_{d_s} = \frac{h_{s,konv} d_s}{\lambda} \quad . \quad (5.29)$$

Nusseltin luku voidaan laskea Gnielinskin korrelaatiolla, kun Reynoldsin luku on suurempi kuin 2300 eli virtaus on turbulентtinen ja Prandtin luku on välillä 0,5–2000. Prandtin luku on aineen ominaisuus ja se on vedelle välillä 1,8–7 matalan lämmönlämpötilan alueella 20–100 °C, eli reunaehto toteutuu (Mills 1999). Gnielinskin korrelaatio Nusseltin luvulle on

$$Nu_v = \frac{(f_v/8)(Re_v-1000)Pr_v}{1+12,7\sqrt{f_v/8}(Pr_v^{2/3}-1)} \quad , \quad (5.30)$$

missä esiintyvä kitkakertoimen  $f_v$  korrelaatio on muotoa

$$f_v = [0,7904 \ln(Re_v) - 1,64]^{-2} \quad . \quad (5.31)$$

Pakotetun konvektion Nusseltin luvulle turbulentiassa putkivirtauksessa on esitetty myös yksinkertaisempi korrelaatio [Raiko & Saarenpää 2010]:

$$Nu_v = 0,023 Re_v^{0,8} Pr_v^{0,4} \quad . \quad (5.32)$$

Reynoldsin luku putken sisäpuolisessa virtauksessa voidaan laskea tunnetusta yhtälöstä

$$Re_v = \frac{u_m d_s}{\nu} \quad , \quad (5.33)$$

jossa  $u_m$  on jäähdytysveden keskimääräinen nopeus putkessa ja  $\nu$  on veden kinemaattinen viskositeetti kyseisessä lämpötilassa. (Mills 1999; Shi et al. 2011)

Kootaan edellä esitetty analyysi ja saadaan lämmönläpäisykertoimeksi  $U_{kok}$  kohteista savukaasuista jäähdytysveteen

$$U_{kok} = \left[ \frac{d_u}{\lambda_v Nu_v} + \frac{d_u \ln(d_u/d_s)}{2\lambda_p} + \frac{1}{(h_{u,konv} + h_{lauht})} \right]^{-1} \quad . \quad (5.34)$$

Lämmönläpäisykertoimen laskennassa jätetään putken sisä- ja ulkopuolisen likaantumisen vaikutus lämpövastukseen huomiotta ja oletetaan lauhdevesikalvon lämpövastus

häviävän pieneksi. Nyt voidaan lämmönläpäisykertoimen avulla esittää lämmönsiirtopinnan yli siirtyvä lämpövirrantiheys

$$q_{\text{kaasusta jäähdtyysveteen}} = U_{\text{kok}}(T_b - T_v) \quad (5.35)$$

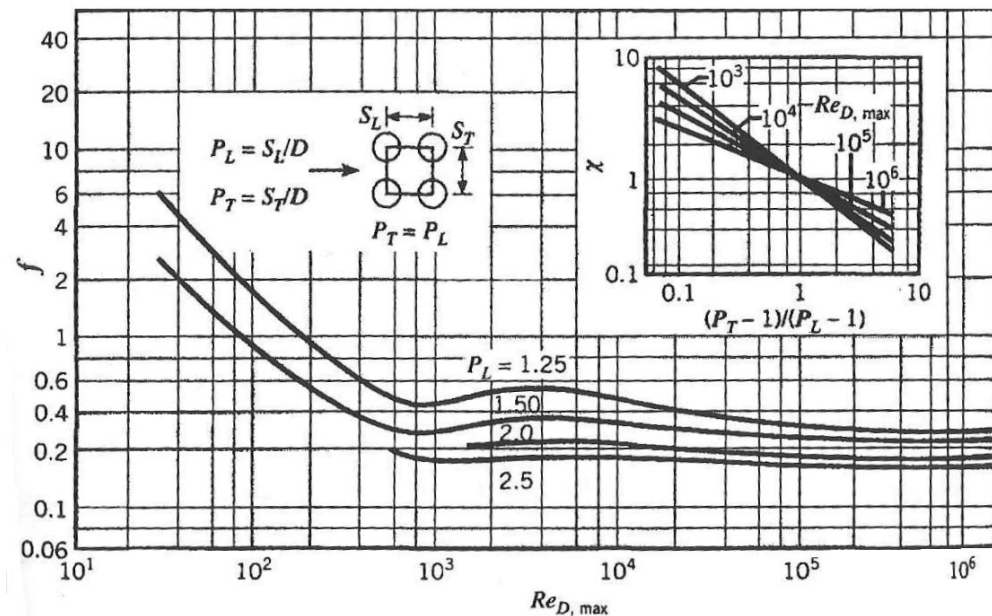
ja siirtyvä lämpöteho

$$\Phi_{\text{kaasusta jäähdtyysveteen}} = U_{\text{kok}} A (T_b - T_v) \quad (5.36)$$

Lämmöntalteenottokattilan mitoituksessa lämmönläpäisykertoimen ohella tärkeä parametri on lämmönsiirtimen aiheuttama painehäviö virtausaineisiin. Putkipaketin pakokaasuvirtaukseen aiheuttama painehäviö saadaan selville yhtälön 5.37 avulla.

$$\Delta p_{\text{pk}} = \frac{1}{2} N f \chi (\rho u_{\text{pk,max}}^2) \quad (5.37)$$

Yhtälössä  $N$  on putkirivien lukumäärä virtaussuunnassa,  $f$  on kitkakerroin,  $\chi$  on korjauskorroin,  $\rho$  virtausaineen tiheys ja  $u$  sen nopeus. Yhtälössä käytettävä kitkakerroin  $f$  on riippuvainen Reynoldsin luvusta ja sen voi lukea seuraavan kuvan käyrästä. Kuvassa 5.13 esitetty kitkakerroin kuvaa sileiden putkien muodostaman neliöjakoisen putkipaketin kitkakerrointa. Jos putkivälitys poikkeaa neliöstä, voidaan käyttää kuvassa esitettyä käyrästä korjauskertoimelle  $\chi$ . Muille kuin riviputkijärjestyksille on omat käyränsä.



**Kuva 5.13** Painehäviön laskentaan tarvittavan kitkakertoimen  $f$  ja korjauskertoimen  $\chi$  käyrästä putkipaketeille, joissa putket on linjassa. (Raiko & Saarenpää 2010)

Tällä analyysillä saatiin selville lauhduttavan lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin, talteenotettu lämpöteho, lauhduvan veden massavirta sekä pakokaasun painehäviö. Tässä luvussa on tarkasteltu pakokaasujen sisältämää matalan lämpötilatason lämpöenergiaa tuntuvana ja latenttina lämpönä sekä teorian avulla tarkasteltu lämmönsiirtoa lauhduttavassa lämmönsiirtimessä. Tarkastellaan seuraavassa luvussa käytännön sovellutuksia lauhduttaville lämmönsiirtimille.



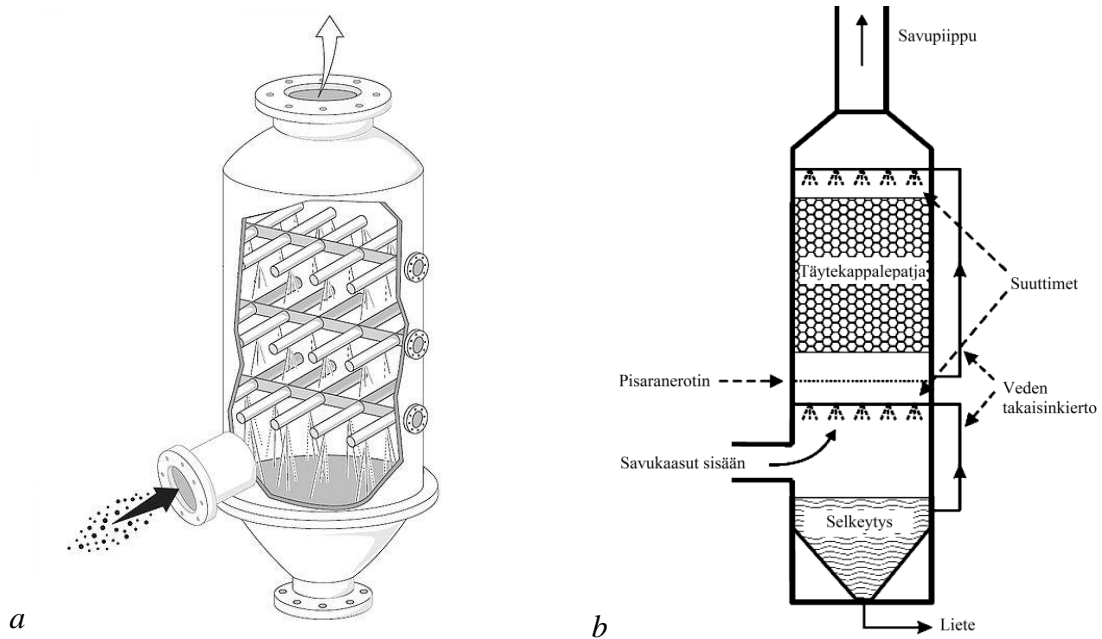
## 6 LAUHDUTTAVAN LÄMMÖNSIIRTIMEN TEKNIKKAA JA SOVELLUSKOhteita

Edellä tarkasteltiin pakokaasujen sisältämän vesihöyryn lauhduttamista ja latenttilämmön talteenottoa kondensoivassa lämmönsiirtimessä energiapotentiaalin sekä lämmönsiirron teorian pohjalta. Tässä luvussa tarkastellaan olemassa olevia lauhdelämmön talteenoton teknisiä ratkaisuja, happokorroosion vaikutusta lauhduttavan lämmönsiirtimen materiaalivalintaan sekä matalan lämpötilatason lämmön hyötykäyttömahdollisuuksia.

### 6.1 Latenttilämmön talteenoton teknisiä ratkaisuja

Lauhdelämmön talteenottoon savukaasuista on olemassa erilaisia teknisiä ratkaisuja. Savukaasujen ominaispiirteisiin kuuluu, että suurin osa savukaasuista on lauhtumattomia kaasuja, kuten typpeä ja hiilidioksidia, ja ne sisältävät vain pienen osan vesihöyryä. Lauhtumattomien kaasujen suuren osuuden takia savukaasujen vesihöyryn lauhduttaminen on erilaista kuin esimerkiksi höyryn lauhduttaminen ja siksi vaatii erilaisia ratkaisuja.

Savukaasulauhduttimet voivat olla tyypiltään suoria tai epäsuoria lämmönvaihtimia. Suorassa lauhduttimessa savukaasuvirtaan ruiskutetaan vettä, joka puhdistaa ja jäähdyttää tyypillisesti vastavirtaan virtaavia savukaasuja. Yleensä savukaasut virtaavat suoraan lauhduttimeen alhaalta, kun taas vesi ruiskutetaan ylhäältä ja se virtaa erilaisten lämmönsiirtopinta-alaa lisäävien kerrosten läpi lauhduttimen pohjalle, josta se voidaan kerätä talteen. Likaisten savukaasujen yhteydessä käytetään tällaisia pesureita puhdistamaan savukaasuja hiukkasista sekä happamista ja muista haitallisista kaasuista. Pesurit voidaan toteuttaa käyttämällä monenlaista tekniikkaa, ja ne voidaan luokitella lämmönsiirtopintaa lisäävän toteutuksen mukaan levypesureiksi ja täytekappalepesureiksi. Lisäksi on olemassa avoimen rakenteen malleja, joissa vesipisarat sekoitetaan suoraan savukaasuvirtaan ilman lämpöpintoja. Tällaisen suihkusuutinpesurin periaatekuva on esitetty kuvassa 6.1a. Täytekappalepesurista on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva kuvassa 6.1b. Täytekappale- tai levypesureiden lauhdeveden takaisinkierrosta voidaan ottaa lämpöä talteen lämmönvaihtimen avulla, mutta kuvassa (6.1b) ei tällaista järjestelyä ole. (Chen et al. 2012)



**Kuva 6.1** Esimerkkejä savukaasujen suoran lauhdutuksen tekniikoista: a) suihkusuutinpesuri b) täytekalapalepesuri. Muokattu lähteestä (Sippula et al. 2009).

Lauhdelämpöä voidaan ottaa talteen myös perinteisillä lämmönsiirtimillä, kuten vaippa-putki-, levy-, putki- tai ripaputkilämmönsiirtimillä. Tällöin savukaasupuolella on märkä osa tai mahdollisesti lämmönsiirtimen koko alalla tapahtuu lauhtumista, jolloin lämmönsiirrinpinnat ovat kauttaaltaan märkiä. Tällaista ratkaisua kutsutaan epäsuoraksi lauhduttamiseksi, ja sille on ominaista, että jäähdytysvesi ja savukaasut eivät ole suorassa kosketuksessa keskenään, vaan niiden välillä on lämmönsiirtopinnat. Luvussa 5.3 esitellyissä tutkimuksissa käytettiin epäsuoraa lauhdutusta. Tyypillisesti epäsuora lauhdutin on vaippa-putkityyppinen lämmönvaihdin. Epäsuorassa lämmönvaihtimessa jäähdytysvesi voidaan lämmittää korkeampaan lämpötilaan kuin suorassa lämmönvaihtimessa, jopa 90 °C:een, ja voidaan saavuttaa alhaiset savukaasujen poistumislämpötilat, jopa 25 °C riippuen jäähdytysveden sisäänmenolämpötilasta. Toisaalta lämmönvaihtimen asteisuus on hieman korkeampi. Ripaputkityyppisissä lämmönsiirtimissä rivat suurentavat kontaktipintaa savukaasuihin, mutta ripojen lämpötila on putken pintalämpötilaa korkeampi, jolloin savukaasuja ei saada jäähdytettyä yhtä lähelle jäähdytysveden sisäänmenolämpötilaa kuin vaippa-putki-lämmönvaihtimissa. Savukaasuja voidaan kostuttaa ennen lauhduttavaa lämmönsiirrintä, jolloin savukaasut kyllästyvät vesihöyrystä ja koko lämmönsiirtimen alalla tapahtuu lauhtumista. Kostutus voidaan toteuttaa kerätyllä lauhdevedellä, jolloin syntyy suljettu kierto ja lisävettä ei tarvita. Osa lauhdevedestä ohjataan kostutukseen ja loput voidaan puhdistaa ja päästää jätevesiviemäriin. Märät lämmönsiirtopinnat vaativat korroosionkestäviä materiaaleja kaikille lämmönsiirtimen savukaasupuolen pinnoille. (Chen et al. 2012; Väre 2014)

Maakaasumoottorivoimalaitosten pakokaasujen lauhdutukseen sopivat epäsuorat lauhduttimet paremmin puhtaiden pakokaasujen ansiosta, sillä puhdistukselle on huo-

mattavasti vähemmän tarvetta kuin esimerkiksi biomass-, jäte- tai fossiilisten polttoaineiden kattilalaitosten yhteydessä. Epäsuorassa lauhdutuksessa jäähdytysvesi voidaan lämmittää korkeampaan lämpötilaan kuin suorassa lauhdutuksessa, jossa lämpötilarajana on kastepiste, ja korkeamman lämpötilan lämpöenergialla on yleisesti enemmän käyttökohteita. Alfa Laval Aalborg Oy valmistaa ripaputkikattiloita savukaasujen lämmöntalteenottoon sekä tuliputkikattiloita lähinnä laivamoottoreiden ekonomaisereiksi. Kehitetään tässä työssä lauhduttavaa lämmönsiirrintä Alfa Laval Aalborg Oy:n tuoteportfolioon heidän osaamisensa ja totuttujen lämmönsiirrinratkaisujen pohjalta, minkä vuoksi keskitytään epäsuoriin savukaasulauhduksiin.

## 6.2 Happokorroosio matalan lämpötilatason lämmöntalteenotossa

Vaikka tässä työssä keskitytään maakaasuperäisten, vähärikkisten pakokaasujen lämmöntalteenottoon, on syytä tarkastella happokorroosiota ja sen ehkäisemistä matalan lämpötilatason lämmönsiirrossa fossiilisten polttoaineiden yhteydessä. Etenkin matalan lämpötilan lämmöntalteenottokattiloissa happokastepisteen merkitys kasvaa. Rikkihappo on metallipinnoille tiivistyessään voimakkaasti syövyttävä aine. Perinteinen ratkaisu ehkäistä happokorroosiota lämmönsiirtopinnoilla on pitää pakokaasujen poistumislämpötila happokastepisteen ja turvamarginaalin yläpuolella, jolloin rikkihappo ei pääse tiivistymään pinnoille. Tämä johtaa suhteellisen korkeaan pakokaasujen poistumislämpötilaan etenkin rikkipitoisilla polttoöljyillä ja täten vähentää lämmöntalteenottomahdollisuuksia. Myös polttoteknisiä ratkaisuja ja puhdistusmenetelmiä on kehitetty pakokaasujen rikkipitoisuuden vähentämiseksi, jolloin lämmöntalteenoton loppulämpötilaa voidaan laskea. Lämmönsiirtopinnoille on kehitetty myös päällystysmateriaaleja ehkäisemään pintojen korroosiota, jolloin on voitu laskea loppulämpötila alle happokastepisteen. Voimakkainta korroosio on 20–30 °C happokastepisteen alapuolella.

### 6.2.1 Rikkiyhdisteet pakokaasuissa

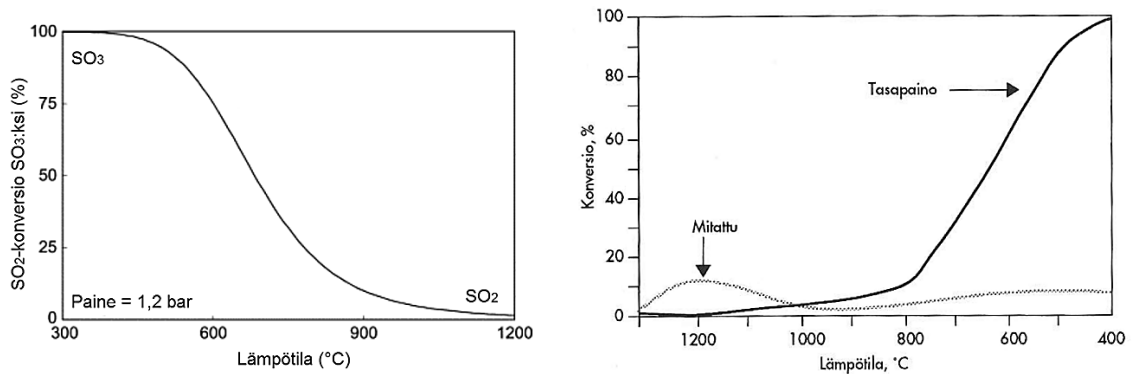
Maakaasu on hyvin vähärikkinen polttoaine, Oksasen (2010) mukaan maakaasun rikkipitoisuus vaihtelee välillä 0,0005–0,02 m-%. Maakaasun rikki on yleensä sitoutunut rikkivetyyn (H<sub>2</sub>S). Muissa fossiilissa polttoaineissa rikkipitoisuudet ovat korkeammat, esimerkiksi kevyessä polttoöljyssä rikkiä on 0,05–0,5 m-% ja raskaassa polttoöljyssä 1–4 m-%. Maakaasua kaksoispolttoainemoottoreissa poltettaessa myös sytytyspolttoaineen, yleisesti kevyen polttoöljyn, rikkipitoisuus vaikuttaa polttoprosessin ja pakokaasujen rikkiyhdisteiden muodostumiseen. Polttoaineen sisältämä rikki vapautuu poltossa ja reagoi hapen läsnä ollessa muodostaen oksideja. Rikkivedystä rikin on todettu vapautuvan ja hapettuvan nopeasti rikkidioksidiksi (SO<sub>2</sub>). Rikin hapettumisen reaktioyhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti:



Osa muodostuneesta rikkidioksidista reagoi edelleen rikkitrioksidiksi ( $\text{SO}_3$ ) yhtälön 5.20 mukaan.



Kattilapintojen kannalta rikkitrioksidin pitoisuus on merkittävä, vaikka rikkidioksidin ja -trioksidin ympäristövaikutukset ovatkin samat. Rikkidioksidin konversio rikkitrioksidiksi riippuu muun muassa lämpötilasta, yhtälön 6.2 tasapainokäyrä nähdään kuvassa 6.2. (Iisa 2002)



**Kuva 6.2** a) Tasapainokäyrä rikkidioksidin konversiolle rikkitrioksidiksi. Muokattu lähteestä (King et al. 2013). b) Rikkidioksidin konversio rikkitrioksidiksi: tyypilliset savukaasuista mitatut pitoisuudet sekä tasapainoarvot. (Iisa 2002)

Rikkitrioksidia muodostuu poltossa kahdella tavalla: termisesti korkeissa lämpötiloissa, yli 1100 °C:ssa, ja katalyyttisesti matalissa lämpötiloissa, noin 500–800 °C:ssa. Polttomoottoreissa rikkitrioksidien muodostuminen on pääasiassa katalyyttistä, sillä termiseen muodostumiseen vaadittavaan lämpötilaan ei polttoprosessissa nousta. Katalyyttien olemassa olo reaktiossa on välttämätöntä reaktion tapahtumiselle, sillä ilman katalyyttiä rikkidioksidi ei käytännössä lainkaan hapetu rikkitrioksidiksi. Katalyytteina toimivat polttoprosesseissa pintojen likakerrostumat, erityisesti raskasta polttoöljyä poltettaessa vanadiinista muodostunut  $\text{V}_2\text{O}_5$  katalysoi hapettumista. Tasapainokäyrän mukaan rikkitrioksidia muodostuu eniten alhaisissa lämpötiloissa. Jotta rikkidioksidi saavuttaisi tasapainokäyränsä mukaisen korkean konversioasteen rikkitrioksidiksi, tarvitaan kuitenkin pitkät viipymäajat reaktiolle suotuisissa lämpötiloissa (400–600 °C) katalyyttien läsnä ollessa. Polttomoottoreissa kuten muissakin polttoprosesseissa viipymäajat ovat lyhyitä eikä katalyyttejä ole läsnä tarpeeksi, jotta reaktio suosisi rikkitrioksidin muodostumista. Polttoprosessien yhteydessä mitatut rikkitrioksidipitoisuudet ovatkin näistä syistä huomattavasti alhaisemmat, kuin tasapainokäyrä antaisi olettaa, mikä nähdään kuvasta 6.2b. Moottorissa muodostuneen rikkitrioksidin määrä onkin hyvin pieni, enintään 1–5 % prosenttia rikkidioksidin määrästä. (Iisa 2002; King et al. 2013)

Myös paine vaikuttaa rikkitrioksidin muodostumiseen. Paineen kasvaessa tasapaino suosii kaasua, jota on ainemäärältään vähemmän, ja yhtälön 6.2 tasapaino siirtyy

rikkitrioksidin puolelle. Kuitenkin paineen vaikutus konversioon on paljon vähäisempää kuin lämpötilan vaikutus, joka hallitsee tasapainoyhtälöä. (King et al. 2013)

Alhaisissa lämpötiloissa rikkitrioksidi reagoi nopeasti vesihöyryn kanssa muodostaen kaasumaista rikkihappoa ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Reaktio on yhtälön 6.3 mukainen.



Rikkitrioksidin reaktio rikkihapoksi noudattaa tasapainokäyrää. Alle  $200\text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa yli 95 % rikkitrioksidista reagoi edelleen rikkihapoksi, eli rikkitrioksidin määrä pakokaasuissa on oleellinen rikkihapon muodostuksen kannalta. Rikkihappo alkaa tiivistyä pinnoille, jos näiden lämpötilat alittavat happokastepisteen. Happokastepistettä tarkastellaan tarkemmin seuraavassa alaluvussa. (Iisa 2002)

Rikkidioksidi muodostaa vesiliuoksessa rikkihapoketta ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ) seuraavasti:



Rikkihapoketta muodostuu siis vesikastepisteen alapuolella, kun pakokaasujen rikkidioksidi reagoi pinnoille lauhtuneen veden kanssa.

Rikin oksideja voidaan poistaa jäähtyneistä savukaasuista kalsiumpohjaisten yhdisteiden avulla. Tämä puhdistus tapahtuu yleensä pesureissa, joita käsiteltiin suoran lauhdutuksen yhteydessä. Kaasuihin syötetään rikkioksideja sitovaa lietettä, joissa aktiivinen yhdiste on joko kalsiumkarbonaatti ( $\text{CaCO}_3$ ) tai kalsiumhydroksidi ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Tällaisilla määrillä rikinpostomenetelmillä kaasu saadaan yli 95-prosenttisesti puhdistettua rikin oksideista. Rikkipitoisia polttoaineita poltettaessa tulee savukaasut puhdistaa rikin oksideista, mutta maakaasua käytettäessä se ei yleensä ole tarpeen. (Iisa 2002)

### 6.2.2 Happokastepiste

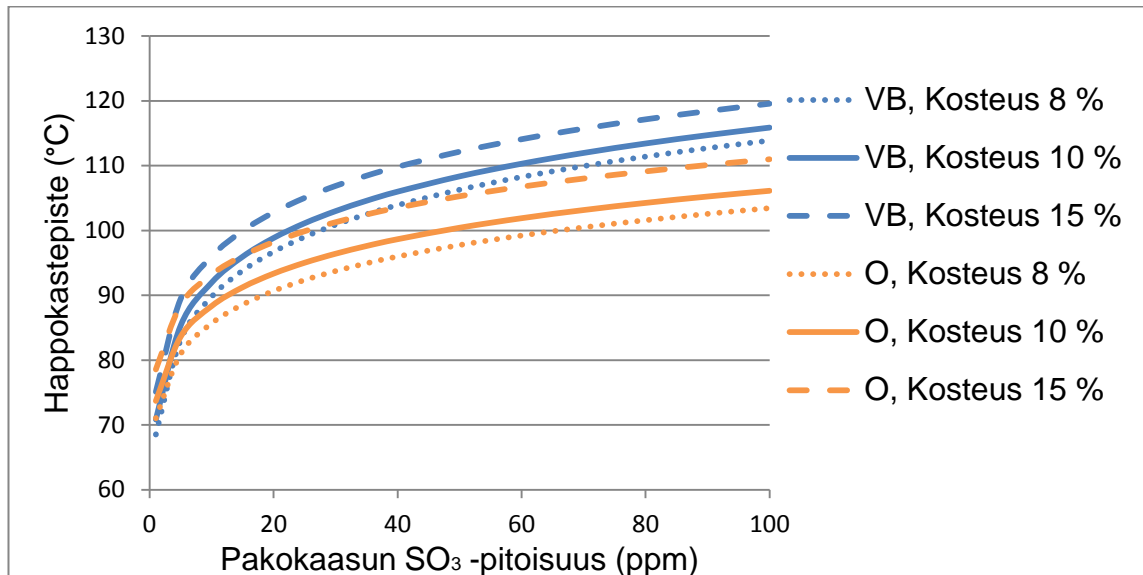
Yleisesti lämmöntalteenottokattilan mitoitukseen vaikuttava kriittinen lämpötila on happokastepiste. Happokastepiste on lämpötila, jossa pakokaasussa olevat happokaasut alkavat tiivistyä pisaroiksi. Tämän lämpötilan alapuolella kattilan pinnoille tiivistyvät hapot syövyttävät pintoja voimakkaasti. Rikkihapon kastepiste on happokastepisteistä korkein, joten se on rajoittavin lämpötila korroosion ehkäisyssä. Rikkihapon kastepiste riippuu savukaasujen vesi- ja rikkitrioksidipitoisuuksista. Verhoff ja Banchemo (1974) sekä Okkes (1987) kehittivät korrelaatiot pakokaasujen rikin happokastepisteen ennustamiselle. Verhoffin ja Banchemon malli on esitetty yhtälössä 6.5 ja Okkesin malli yhtälössä 6.6:

$$\frac{1}{ADT} = 0,002276 - 0,00002943 * \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) - 0,0000858 * \ln(p_{\text{SO}_3}) + 0,00000620 * \ln(p_{\text{H}_2\text{SO}_4}) * \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) \quad , \quad (6.5)$$

$$ADT = 365.6905 + 11.9864 * \ln(p_{\text{H}_2\text{O}}) + 4.70336 * \ln(p_{\text{SO}_3}) + (0.446 * \ln(p_{\text{SO}_3}) + 5.2572)^{2,19} \quad , \quad (6.6)$$

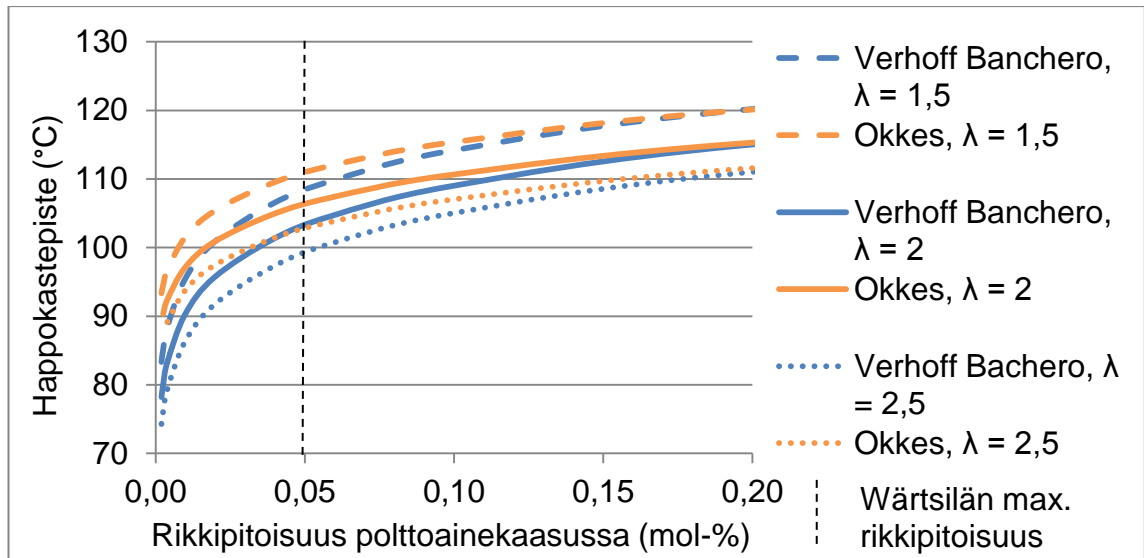
joissa  $ADT$  tarkoittaa happokastepistettä ja  $p$  kunkin komponentin osapainetta pakokaasuissa (ZareNezhad & Aminian 2011). Yhtälöissä osapaineiden yksikkö on eloho-

peamillimetri ja happokastepistelämpötilan yksikkö on kelvin. Seuraava kuva esittää happokastepistettä pakokaasun rikkiatrioksidin funktiona eri pakokaasujen kosteuspitoisuuksilla Verhoffin ja Bancheron sekä Okkesin mallin mukaan. Kuvassa happokastepistettä on tarkasteltu pakokaasujen suhteellisen matalilla rikkiatrioksidipitoisuuksilla 0–100 ppm, jolloin havaitaan happokastepisteen olevan noin välillä 70–120 °C. Rikkipitoisia polttoaineita käytettäessä SO<sub>3</sub>-pitoisuus savukaasuissa voi nousta hyvinkin korkealle, jolloin myös happokastepiste kosteilla savukaasuilla voi nousta yli 180 °C:een.



**Kuva 6.3** Happokastepiste pakokaasun rikkiatrioksidin funktiona eri pakokaasujen kosteuspitoisuuksilla Verhoffin ja Bancheron (VB) sekä Okkesin (O) mallin mukaan. Pakokaasun paineena käytetty 2 kPa:n ylipainetta.

Edellä tarkasteltiin happokastepistettä tunnetulla pakokaasukoostumuksella. Arvioidaan seuraavaksi maakaasun rikkipitoisuuden sekä polton ilmakertoimen vaikutusta happokastepisteeseen, kun pakokaasun koostumus ei ole tiedossa. Kuvaaja 6.4 esittää rikkihapon kastepistettä maakaasupolttoaineen rikkipitoisuuden funktiona. Happokastepiste on laskettu Verhoffin ja Bancheron sekä Okkesin malleilla kolmella eri moottorin ilmakertoimen arvolla. Laskennassa on käytetty maakaasua, jonka koostumus on esitelty taulukossa 5.1, ympäristön lämpötilassa 20 °C suhteellisen kosteuden ollessa 50 %. Edellä kuvattujen SO<sub>3</sub>-konversiotarkasteluiden perusteella on oletettu, että 3 % pakokaasujen rikkidioksidista hapettuu rikkiatrioksidiksi ja että kaikki rikkiatrioksidi reagoi rikkihapoksi. Vesihöyryn mooliosuus pakokaasuissa on näillä oletuksilla 13,7 %, kun ilmakerroin on 1,5 ja 10,7 % ilmakertoimella 2 sekä 8,9 % ilmakertoimella 2,5. Kuvaan on myös merkitty Wärtsilän hyväksymän maakaasupolttoaineen rikkipitoisuuden yläraja SG-moottoreidensa sisäänmenossa, joka esiteltiin taulukossa 2.8.



**Kuva 6.4** Maakaasupolttoaineen rikkipitoisuuden ja polton ilmakertoimen vaikutus pakokaasujen rikkihappokastepisteeseen. Pakokaasut 2 kPa:n ylipaineessa.

Kuvasta havaitaan, että hyvinkin pieni rikkipitoisuus maakaasussa nostaa pakokaasujen happokastepisteen 80–120 °C:een ja että alhaisilla pitoisuuksilla rikkipitoisuuden muutos vaikuttaa merkittävästi happokastepisteeseen. Kuten eroavaisuudet eri malleilla laskettaessa kuvaavat, rikkihapon kastepisteen tarkka ennustaminen on haastavaa. Kuvista 6.3 ja 6.4 havaitaan, että hyvin pienillä pitoisuuksilla Okkesin malli antaa Verhoffin ja Bancheron mallia korkeamman lämpötilan, mutta korkeammilla pitoisuuksilla Verhoffin ja Bancheron malli antaa korkeamman happokastepisteen. Kastepistelämpötilaan vaikuttaa pakokaasujen kosteuspitoisuus sekä rikkiatrioksidin osapaine, jotka muuttuvat sekä ympäristöolosuhteiden muuttuessa että polttoaineen koostumuksen vaihdeltessa. Happokastepistettä voidaankin arvioida parhaiten, jos pakokaasujen koostumus tunnetaan. Happokastepiste on logaritmisesti riippuvainen pakokaasun rikkiatrioksidipitoisuudesta, minkä vuoksi rikkiatrioksidin määrän alentamisella ei ole suurta vaikutusta happokastepisteeseen. Alhainen rikkiatrioksidipitoisuus voi kuitenkin merkittävästi hidastaa korroosionopeutta ja on siten hyödyllinen. Korroosionopeus on suoraan verrannollinen rikkihappopitoisuuteen eli käytännössä rikkiatrioksidipitoisuuteen. (Iisa 2002)

Vesikastepiste on happokastepistettä alhaisempi vähärikkisiäkin polttoaineita käytettäessä. Tällöin hyvinkin vähärikkisillä polttoaineilla rikkihappo tiivistyy lämmöntalteenottokattilan pinnoille korkeammassa lämpötiloissa kuin vesihöyry alkaa lauhtua ja luovuttaa latenttilämpöään. Käytetyn maakaasun tulee siis olla rikitöntä, jotta happokorroosio ei aiheuta ongelmia jäähdytettäessä pakokaasuja happo- ja vesikastepisteiden alapuolelle. Todellisuudessa maakaasun rikkipitoisuus on hyvin alhainen, mutta ei niin olematon, että sen voisi jättää huomiotta.

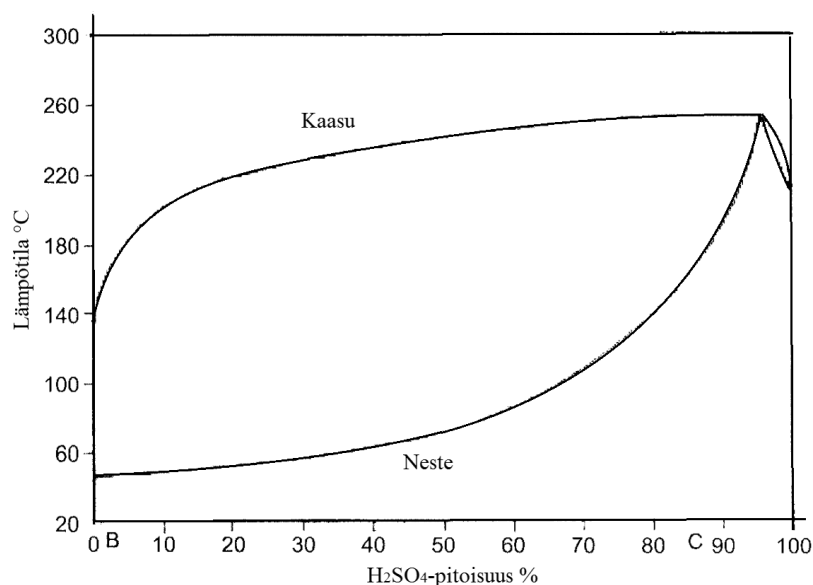
### 6.2.3 Happokorroosio ja materiaalivalinnat

Tavallisesti lämmöntalteenottokattilan materiaalina käytetään hiiliterästä sen hyvän lämmönjohtavuuden ja edullisen hinnan takia. Hiiliteräksen kuumuudenkesto ulottuu

noin 450 °C:een, mikä yleensä on riittävä pakokaasujen lämmöntalteenotossa. Matalan lämpötilan lämmöntalteenotossa putki- ja kattilamateriaalit joutuvat kuitenkin kestä-  
mään jatkuvaa kosketusta veden ja happoyhdisteiden kanssa, mikä asettaa materiaaliva-  
linnoille haasteita.

Pakokaasujen rikkiyhdisteet voivat pinnoille tiivistyessään aiheuttaa metallin korroosiota. Metalliseoksen korroosiosuoja perustuu metalliseospinnalle muodostuneen tiiviin metallioksidin suojaavaan ominaisuuteen. Kromi, molybdeeni, alumiini ja pii parantavat metalliseoksen oksidipinnan korroosiokestävyyttä, minkä vuoksi näitä käytetäänkin korroosionkestävien metallien seosaineina. Pinnan oksidikerros ei estä metallin syöpmistä, mutta hidastaa sitä. Metallin korroosiosuojan ollessa heikentynyt rikkiyhdisteet pääsevät reagoimaan metallin kanssa muodostaen sulfideja, jotka eivät enää anna metalleille korroosiosuojaa, ja tapahtuu syöpmistä. (Skrifvars & Hupa 2002)

Korroosionopeuteen vaikuttavat pinnoille tiivistyneiden happamien yhdisteiden koostumus, määrä, väkevyys sekä pintamateriaali. Rikkihapon ja -hapokkeen lisäksi myös typpi- ja klooriyhdisteet aiheuttavat korroosiota. Kuitenkin typpidioksidin ja vetykloridin kastepisteet ovat rikkihapon kastepistettä alhaisempia, pienillä pitoisuuksilla käytännössä samat kuin vesikastepiste, joten lauhdutusta edeltävillä lämmönsiirtopinnoilla rikkihapon kastepiste on merkittävin. Pinnoille tiivistyneen rikkihapon väkevyys saadaan selville sen faasidiagrammista, joka on esitetty kuvassa 6.5. Esimerkiksi 60 °C:ssa rikkihappo on 40-prosenttista, mikä on hyvin syövyttävä neste ja aiheuttaa tasaista korroosiota. (Huijbregts & Leferink 2004) Rikkihappoa on savukaasuissa kaasumaisena, mutta vasta pinnoille tiivistyessään happokastepisteen alapuolella se alkaa aiheuttaa korroosiota. Rikkihapoketta taas muodostuu vasta vesikastepisteen alapuolella, jolloin lauhdeveteen liuennut rikkidioksidi reagoi vesimolekyylien kanssa (yhtälö 6.4). Rikkidioksidin suuresta määrästä johtuen verrattuna rikkitrioksidiin, rikkihapoke on väkevää ja aiheuttaa rikkihappoa enemmän korroosiota lauhdeveden talteenoton yhteydessä. (Huhtinen et al. 2000)



**Kuva 6.5** Rikkihapon faasidiagrammi. Muokattu lähteestä (Huijbregts & Leferink 2004)



Lämmönsiirtopinnoille lauhtunut rikkihappo on happokastepistettä alhaisemmissa mutta vesikastepistettä korkeammissa lämpötiloissa noin kaksi kertaluokkaa väkevämpää kuin vesikastepisteen jälkeen, jolloin lauhtunut vesi laimentaa happoa. Tämän vuoksi rikkipitoisten kaasujen yhteydessä voidaan käyttää eri materiaaleja matalan lämpötilan lämmöntalteenottoon happokastepisteen alapuolella ja lauhdelämmön talteenottoon vesikastepisteen alapuolella. Levy et al. päätyivät korroosiotesteissään tulokseen, että nikkeliä, kromia ja rautaa sekä pieniä määriä molybdeeniä, volframia ja kobolttia sisältävät metalliseokset sekä polymeerit FEP ja Teflon sopivat parhaiten korkean rikkihappopitoisuuden alueelle. Teflonilla on metalliseoksiin nähden huomattavasti matalampi lämmönjohtumiskerroin, minkä vuoksi lämmönsiirtopintaa tarvitaan paljon enemmän. Pidemmät lämmönsiirtoputket aiheuttavat suuremmat painehäviöt sekä kaasun- että vesipuolelle ja siten enemmän kustannuksia pumppuihin ja mahdollisesti pakokaasupuhaltimiin. Teflon on yksikköhinnaltaan metalliseosputkia halvempaa, mutta kokonaiskustannuksia laskettaessa metalliseoksesta valmistetut lämmönsiirtimet saattavat tulla edullisemmiksi. Matalan happopitoisuuden alueella voidaan käyttää ruostumatonta terästä, joka kestää hyvin laimeiden rikkihapon vesiliuoksien korroosiota vastaan ja joka johtaa hyvin lämpöä. Lisäksi ruostumaton teräs on luja ja suhteellisen edullinen materiaali. Chen et al. (2012) mukaan austeniittiset tai ferriittiset kromilla, molybdeenillä ja nikkelillä seostetut teräkset ovat tyypillisiä savukaasulauhduttimien lämmönsiirtomateriaaleja. Materiaalin tärkein ominaisuus on korkea lämmönjohtavuus, mikä tulee korroosionkeston ohella ottaa huomioon materiaalivalinnassa. (Levy et al. 2011; Chen et al 2012)

Lisäksi Levy et al. testasivat pakokaasujen rikkihapon vähentämistä ennen kondensoivia lämmönsiirtopintoja. Pakokaasukattilaan voidaan lisätä happokastepisteen alapuolelle jäähdytettyjä levyjä, niin kutsuttuja happoerottimia, joihin rikkihappo lauhtuu. Tällaisilla erottimilla voidaan poistaa 10–14 prosenttia rikkihaposta, jos happoerotin toimii vesikastepisteen yläpuolella, ja 30–40 prosenttia niiden toimiessa vesikastepisteen alapuolella. Myös happokastepisteen alapuolella ensimmäinen lämmönsiirrin toimi tällaisena happoerottimena, johon rikkihappo väkevänä lauhtui. Näin voidaan laimentaa kondensoiville lämmönsiirtopinnoille lauhtuvaa rikkihappoa ja siten vähentää näiden korroosiota. (Levy et al. 2011)

Pakokaasujen kustutus kastepisteeseen jo ennen lauhduttavaa lämmönsiirrintä mahdollistaa lauhtumisen koko lämmönsiirtimen alueella, jolloin kaikki lämmönsiirtopinnat ovat märkiä ja rikkihappoa esiintyy pinnoilla vain lauhdeveden laimentamana. Myös muodostunut rikkihapoke laimenee lauhdevesimäärän lisääntyessä.

Lauhdelämpöä talteenottaessa muodostunut lauhdevesi sisältää rikkihappoa ja rikkihapoketta, joten vesi on lämmönsiirtopintoja, lämmönvaihtimen pohjamateriaaleja sekä lauhdeveden poistoputkistoja syövyttävää. Lauhdevesi tuleekin käsitellä esimerkiksi kalsiumyhdisteillä ennen päästämistä viemäriin. Kalsiumin syöttämistä jo savukaasuihin tai lauhdevesikerrokseen lämmönvaihtimen pohjalla tulee harkita lauhduttimen syöpymisen ehkäisemiseksi.

## 6.3 Jätelämmön hyötykäyttömahdollisuudet

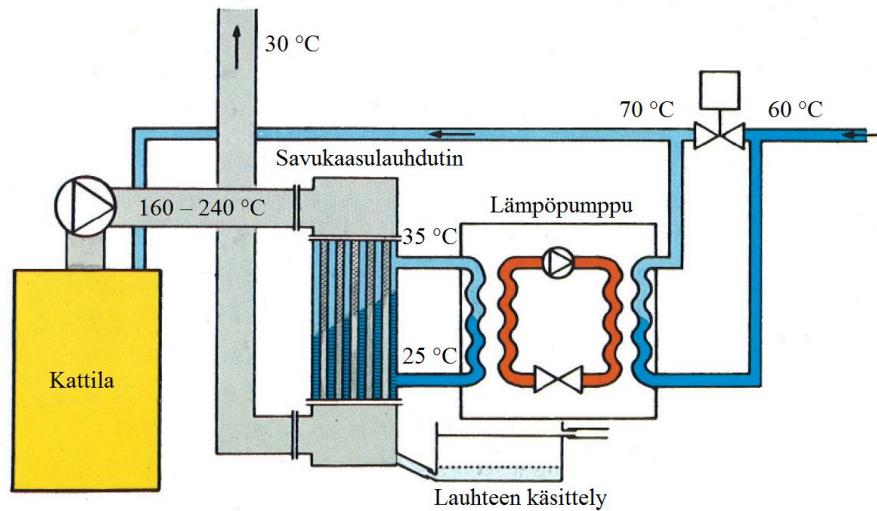
Jätelämmön talteenoton ja käytön hyödyt ovat ilmeiset. Voimalaitosten kokonaishyötysuhde kasvaa kymmenillä prosenttiyksiköillä, jos voimantuotannossa syntyvä lämpöenergia otetaan talteen ympäristöön päästämisen sijaan. Primäärienergiaa säästyy, kun käytetään sivuvirtana syntyvää lämpöä hyödyksi, jolloin erillisen lämmöntuotannon tarve vähenee. Primäärienergian säästö tarkoittaa myös kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä ja täten ilmastonmuutoksen hillitsemisen edistämistä. Samalla primäärienergiamäärällä tuotetun sähkö- tai lämpöenergian kasvaminen tarkoittaa myös energiapoliittisena tavoitteena olevan energiatehokkuuden lisääntymistä. Suuressa osassa voimalaitoksia savukaasuista ja muista jätelämpövirroista otetaan talteen helpoimmin saatavissa oleva ja korkea-arvoisin energia eli kuumien savukaasuvirtojen lämpöenergia. Tällaiselle korkealämpötilaiselle lämmölle on myös paljon jo valjastettuja käyttökohteita, kuten kaukolämpö, teollisuuden prosessit sekä kombikytkennässä lisäsähköntuotanto. Voimalaitoksista talteenotettavan matalan lämpötilatason lämpöenergialle tulee löytää mielekkäitä ja teknis-taloudellisesti kannattavia lämmönkäyttökohteita, jotta niin kutsuttua matala-arvoista jätelämpöä kannattaa ottaa talteen. Tarkastellaan tässä luvussa muutamia mahdollisia lämmönkäyttökohteita matala-arvoiselle lämmölle.

### 6.3.1 Kaukolämpö

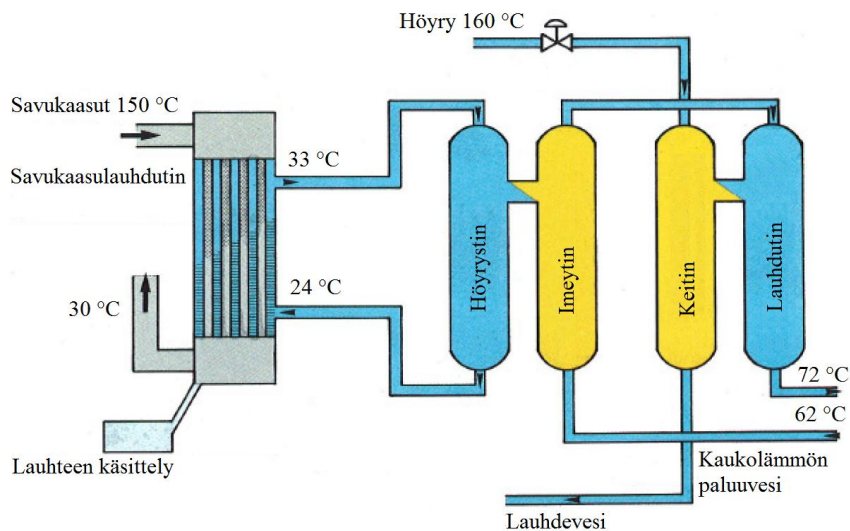
Kaukolämpö on perinteinen ja monissa maissa laajasti käytetty lämmönkäyttökohde. Kaukolämmön avulla teollisuuden prosessien ja voimalaitosten jätelämpövirta voidaan ohjata lämmittämään lähialueen rakennuksia. Kaukolämpö toimii perinteisesti lämmitystarpeeseen nähden suhteellisen kuumalla lämpötila-alueella, kaukolämpöjärjestelmään lämpö-, voima- tai teollisuuslaitokselta lähtevä syöttövesi on noin 80–115 °C ja paluuvesi luokkaa 40–50 °C riippuen järjestelmästä ja vuodenajasta. Kuitenkaan rakennusten lämmitykseen tarvittavan lämpötilatason ei tarvitse olla näin korkea, vaan lämpötilaksi riittää hieman huonelämpötilaa korkeampi taso, luokkaa 30 °C. Matalampi lämpötilataso vaatii kuitenkin nykyisestä poikkeavia teknisiä ratkaisuja lämmityskohteissa. Eräitä ratkaisuja ovat tuulettimella varustetut lämpöpatterit tai lattialämmitys. (Energia Suomessa 2004; Swithenbank et al. 2013)

Matalan lämpötilatason jätelämmön hyödyntäminen voidaan yhdistää kaukolämpöön myös käyttämällä lämpöpumppua, jolloin kaukolämmön paluueden lämpötila voi olla jätelämpökattilan lämpötilatasoa korkeampi. Lämpöpumppu siirtää lämpöä matalamman lämpötilan lämmönlähteestä korkeamman lämpötilan lämpönieluun. Lämpöpumppu kuluttaa energiaa, mikä laskee prosessin kokonaishyötysuhdetta. Lämpöpumppuja on kompressio- ja absorptiotyyppisiä. Kompressiolämpöpumppu koostuu höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta ja paisuntaventtiilistä muodostaen suljetun piirin, jossa kiertää kiertoine. Höyrystimessä kiertoine höyrystyy lämmönlähteestä ottamansa energian avulla, minkä jälkeen se puristetaan kompressorissa korkeampaan paineeseen. Lauhduttimessa kiertoine lauhtuu luovuttaen lämpöenergiaa korkeamman lämpötilan lämpönieluun. Kiertoine palautuu höyrystimeen paisuntaventtiilin kautta.

Absorptiolämpöpumpuissa käytetään kylmäaine-absorbentti-työainepareja, joiden liukoisuuteen ja höyrystymiseen lämpöpumpun toiminta perustuu. Absorptiolämpöpumppu käyttää lämpöenergiaa käyttövoimanaan, kun taas kompressiolämpöpumppu toimii sähköllä. Absorptiolämpöpumppu nostaa lämpöä 25–30 °C lähteestä 80–90 °C nieluun. Erityisen soveltuva absorptiolämpöpumppu on kaukolämpökohteisiin, jotka voivat vastaanottaa suuren määrän lämpöä 80–90 °C lämpötilassa ja jossa on lämpöä tarjolla noin 150 °C lämpötilassa. Kuvassa 6.6 on esitetty lauhduttavan lämmöntalteenottokattilan kytkentä kaukolämmön paluovesipiiriin kompressiolämpöpumpun välityksellä ja kuvassa 6.7 absorptiolämpöpumpun kytkentä lauhduttavaan lämmöntalteenottoon ja kaukolämpöpiiriin. Lämpöpumpun yhdistäminen lauhduttavaan lämmöntalteenottoon on yksinkertainen ratkaisu, mutta sen haittoja ovat korkea energiantarve ja investointikustannukset. (Chen et al. 2010; Chen et al. 2012; Koljonen & Sipilä 1998)



**Kuva 6.6** Lauhduttuvan lämmöntalteenottokattilan kytkentä kaukolämmön paluovesipiiriin kompressiolämpöpumpun välityksellä. Muokattu lähteestä (Chen et al. 2010).



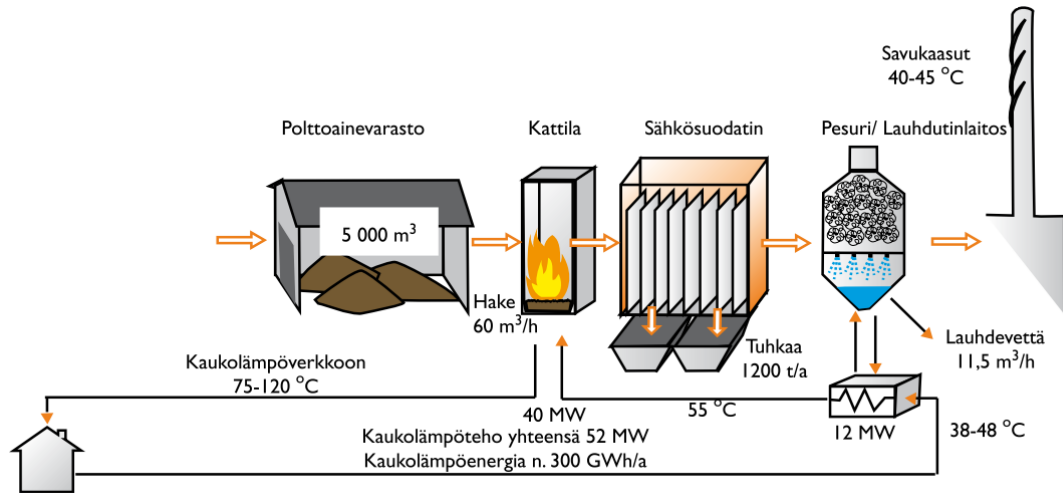
**Kuva 6.7** Lauhduttuvan lämmöntalteenottokattilan kytkentä kaukolämmön paluovesipiiriin absorptiolämpöpumpun välityksellä. Muokattu lähteestä (Chen et al. 2010).

Taulukossa 6.8 on esitetty muutamia esimerkkejä Pohjoismaissa käytössä olevista yhteistuotanto- ja lämpölaitoksista, joissa tuotetaan lauhduttavan lämmöntalteenotton ja lämpöpumpun avulla lisää lämpöä kaukolämpöverkkoon. Kuten esimerkeistä havaitaan, lauhduttavaa lämmöntalteenottoa on käytössä erityisesti kosteiden polttoaineiden kuten biomassojen ja jätteiden polton yhteydessä, jolloin latenttilämpöä on saatavilla enemmän kuin fossiilisten polttoaineiden savukaasuista.

**Taulukko 6.8** Pohjoismaisia voima- ja lämpölaitoksia, joissa on käytössä lauhduttava lämmöntalteenotto yhdistettynä lämpöpumppuun. (Chen et al. 2010; Chen et al. 2012; Kraftvärmeverken 2014; Rökgaskondensering 2014; Södra Näs 2014; Sønderborg 2014; Extended energy 2014).

Voimalaitos	Polttoaine	Laitoksen kapasiteetti	Savukaasulauhduttimen ja lämpöpumpun kapasiteetit
Orihedon lämpökeskus, Turku, Suomi	Biomassa, hakkuujäte	52 MW <sub>th</sub>	12 MW <sub>th</sub> savukaasupesuri
Dåva yhteistuotantolaitos, Umeå, Ruotsi	Biomassa	75 MW <sub>th</sub> , 30 MW <sub>e</sub>	11 MW <sub>th</sub> savukaasulauhdutin, 11,4 MW lämpöpumppu
Södra Näs kaukolämpölaitos, Vimmerby, Ruotsi	Puu- ja kuorihake	10 MW <sub>th</sub>	2 MW <sub>th</sub> savukaasulauhdutin
Vestforbrænding jätteenpolttolaitos, Kööpenhamina, Tanska	Yhdyskuntajäte	74 MW <sub>th</sub> , 24 MW <sub>e</sub>	17 MW <sub>th</sub> savukaasupesuri, absorptiolämpöpumppu
Sønderborg yhteistuotantolaitos, Tanska	Yhdyskuntajäte	42 MW <sub>th</sub> , 52 MW <sub>e</sub>	6 MW <sub>th</sub> savukaasupesuri
Kraftvarmeværk jätteenpolttolaitos, Thisted, Tanska	Yhdyskuntajäte	10,6 MW <sub>th</sub> , 3,3 MW <sub>e</sub>	1 MW <sub>th</sub> savukaasulauhdutin, 17 GWh/a absorptiolämpöpumppu

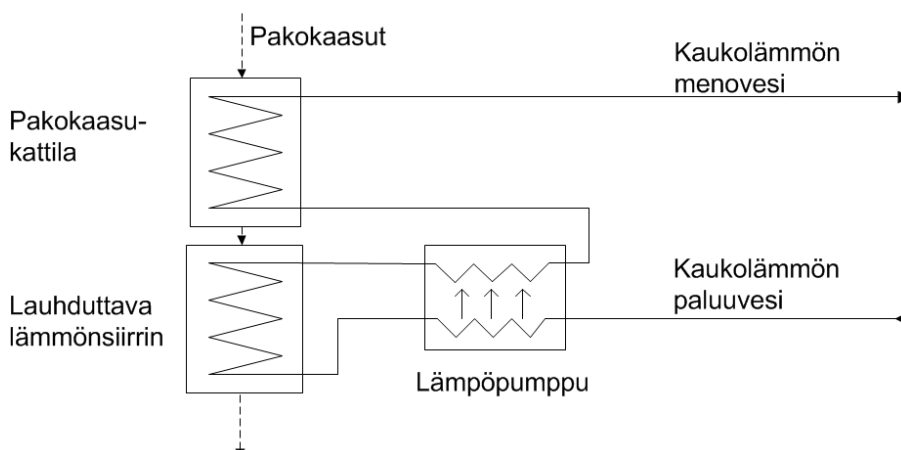
Suomessakin on käytössä savukaasujen lauhduttavaa lämmöntalteenottoa esimerkiksi Orihedon biomassaa polttavassa lämpökeskuksessa, jonka savukaasupesurissa savukaasut jäädytetään 150 °C:sta 35–45 °C:een ja samalla lauhdelämpöä saadaan talteen 12 MW<sub>th</sub>, lämpötilassa 55 °C vesikastepisteen ollessa noin 64 °C. Savukaasujen lauhduttimesta talteenotettu lämpö esilämmittää kaukolämmön paluuvettä ennen biomassakattilaan syöttämistä. Lauhdeveden lämpöä käytetään kiinteistö- ja pihalämmityksessä ja lauhdeveden käyttöä kaukolämmön lisävetenä selvitetään. Täydellä teholla laitoksen hyötysuhde nousee jopa 118 %:iin. Seuraavassa kuvassa on esitetty Orihedon laitoksen periaatteellinen virtauskaavio. (Chen et al. 2010; Orihedon biolämpökeskus 2008)



**Kuva 6.9** Orikedon biolämpökeskus, jossa on lauhdelämmön talteenotto. Muokattu lähteestä (Orikedon biolämpökeskus 2008).

Myös Ekokemin Riihimäen voimalaitoksessa on käytössä savukaasulauhdutin. Voimalaitos polttaa arinakattilassa yhdyskuntajätettä, minkä jälkeen savukaasujen puhdistuksen yhteydessä laitoksessa on suoralla lauhdutusmenetelmällä toimiva savukaasupesuri, jonka tuottamaa lämpötehoa hyödynnetään kaukolämmön tuotantoon. Kaukolämpöä saadaan savukaasulauhduttimesta 12–14 MW<sub>th</sub> lämpötila-alueella 43–65 °C jätepolttoaineen kosteuspitoisuudesta ja kaukolämmön paluuveden lämpötilasta riippuen. Savukaasujen kosteuspitoisuus vaihtelee Ekokemin voimalaitoksella välillä 18–25 %. (Ekokem 2014; Karhu 2014)

Pakokaasujen lauhdelämmön talteenotto voidaan yhdistää kaukolämmön tuotantoon myös toisella lämpöpumpputekniikkaa hyödyntävällä tavalla. Ratkaisun periaate on esitetty kuvassa 6.10.



**Kuva 6.10** Pakokaasujen lämmöntalteenoton tehostaminen lämpöpumpun ja lauhduttavan lämmönsiirtimeen avulla.

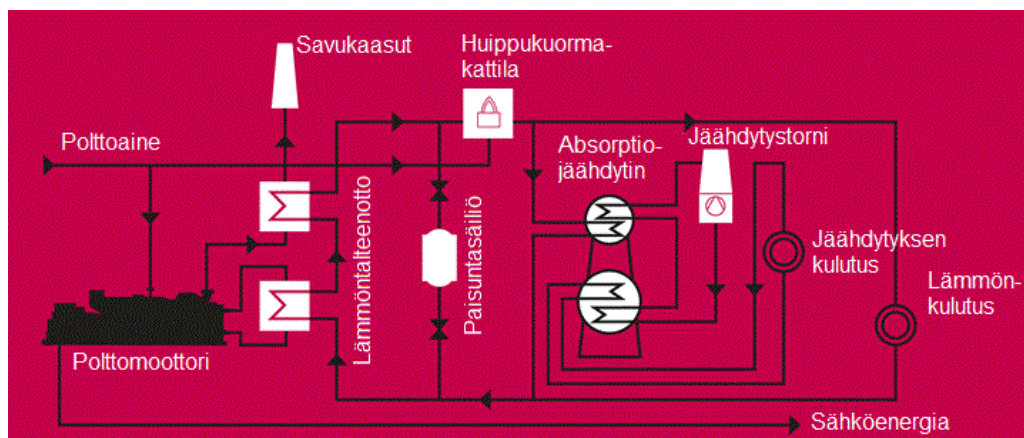
Kaukolämmön paluuvettä voidaan paikallisesti jäähdyttää siirtämällä lämpötehoa lämpöpumpulla kattilan syöttöveeten, jolloin saadaan lauhduttavaan lämmönsiirti-

meen tarvittava alhainen lämpötilataso. Lauhduttavan lämmönsiirtimen jälkeen lämpöenergia pumpataan takaisin kaukolämpöpiiriin, jota kuumennetaan edelleen pakokaasukattilassa. Lämpöpumpun lisääminen piiriin voi mahdollistaa latenttilämmön talteenoton muuten liian kuumaan paluuveteen. Lämpöpumppu kuitenkin kuluttaa energiaa, mikä aiheuttaa investointikustannusten ohella myös jatkuvia käyttökustannuksia sekä heikentää järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. (Calefa 2014)

### 6.3.2 Kaukojäähdytys

Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan jäähdytysenergian tuottamista keskitetysti ja sen jakamista asiakkaille kaukojäähdytysverkon välityksellä vastaavasti kuin kaukolämpöä. Jäähdytyksen merkitys lisääntyy jatkuvasti, samoin kuin sen tuotannon yhdistäminen sähköntuotantoon. Esimerkiksi Lähi-idässä tuotetusta sähköstä käytetään nykyään 70 % sähkökäyttöiseen jäähdytykseen. Myös Euroopassa jäähdytyksen tuotanto lisääntyy, ja onkin mielekästä etsiä energiatehokkaita ratkaisuja jäähdytyksen tuottamiseksi. (Wärtsilä Combined cooling 2013)

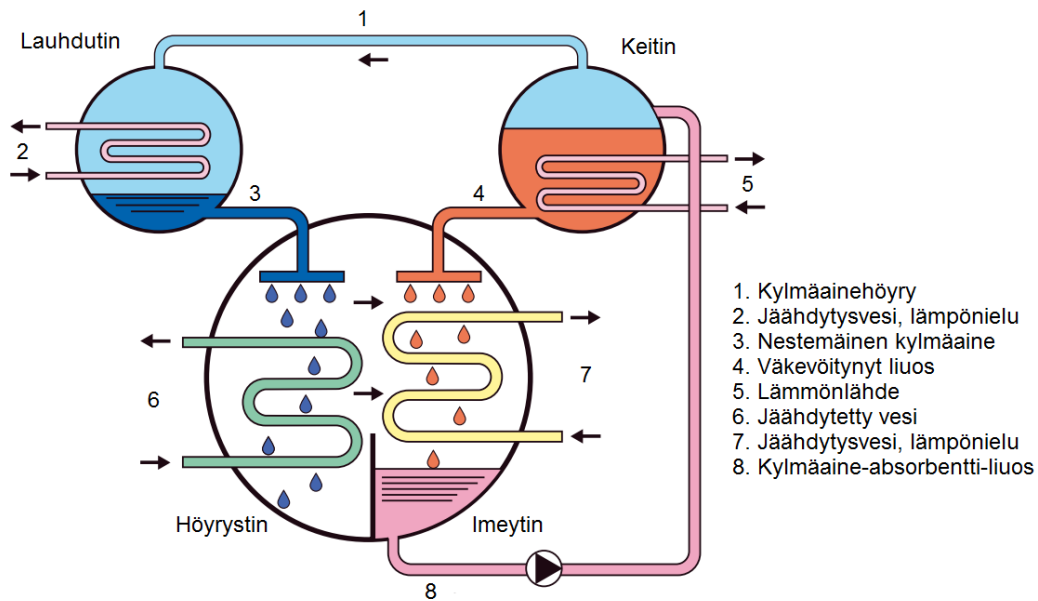
Kaukojäähdytyksen tuotanto voidaan yhdistää moottorivoimalaitoksen lämmöntalteenottoon absorptiojäähdyttimien avulla. Absorptiojäähdyttimet käyttävät moottorilaitoksen jätelämpöä jäähdytyksen tuotantoon. Voimalaitoksissa jäähdytys tuotetaan yleensä kolmoistuotannolla, jossa lämpö-, jäähdytys- ja sähkötehoa tuotetaan samanaikaisesti samasta energianlähteestä. Lämmön, jäähdytyksen ja sähkön yhteistuotannon periaate polttomoottorin ja absorptiojäähdyttimen avulla on esitetty kuvassa 6.11. Kytkenässä voidaan hyödyntää moottorivoimalaitoksen jätelämpöä sekä pakokaasuista että jäähdytysvesistä. Moottorivoimalaitoksen kaikki lämmöntuotto on myös mahdollista valjastaa kaukojäähdytyksen tuotantoon, jos lämmölle ei ole tarvetta. (Koljonen & Sipilä 1998; Balli et al. 2010)



**Kuva 6.11** Yhdistetyn sähkön-, lämmön- ja jäähdytyksen tuotannon periaate polttomoottoriin ja absorptiojäähdytimeen perustuvassa järjestelmässä. Muokattu lähteestä (Trigeneration 2014).

Absorptiojäähdyttimien periaate on samankaltainen kuin absorptiolämpöpumpuissa. Absorptiojäähdytyspiiri koostuu keittimestä, lauhduttimesta, höyrystimestä sekä

imeytimestä. Lisäksi piiri tarvitsee lämmönlähteen, lämpönielun, jäähdytetyn veden piiriin sekä kylmäaine-absorbentti-kierron. Keittimessä piiriin tuodaan lämpöä joko polttoprosessilla tai kuuman vetenä tai höyrynä, jonka avulla laimenettu kylmäaine-absorbenttiliuos höyrystetään. Höyrystynyt kylmäaine virtaa lauhduttimeen, jossa se lauhtuu siirtäen lämpöä lämpönieluun. Nestemäinen kylmäaine virtaa höyrystimeen, jossa siihen sitoutuu jäähdytettävästä vedestä lämpöenergiaa, ja kylmäaine höyrystyy. Keittimestä virtaa väkevöitynyt absorbenttiliuos höyrystimeen, jossa kylmäaine absorboituu siihen ja liuos laimenee. Liuos pumpataan takaisin keittimeen, jossa kierto alkaa alusta. Kuvassa 6.12 on esitetty absorptiojäähdyttimen periaate. (Koljonen & Sipilä 1998; Sanyo 2006; Sanaye & Khakpaay 2014)



**Kuva 6.12** Absorptiojäähdyttimen toimintaperiaate ja osat. Muokattu lähteestä (Sanyo 2006).

Absorptiojäähdyttimillä tuotetaan jäähdytettyä vettä lämpötilassa 5–10 °C ja se voi käyttää lämmönlähteenään kuumaa vettä noin 70–100 °C:ssa, joka palautuu lämmityspiiriin 50–80 °C:ssa. Absorptioprosessin vaatima lämmönlähteen lämpötila riippuu jäähdytettävän veden sekä jäähdytysveden lämpötiloista. Absorptiojäähdytin pystyy näin ollen käyttämään pakokaasujen matalan lämpötilan jätelämmön lisäksi myös moottorin jäähdytyspiirien lämpöä. Mitä korkeammassa lämpötilassa energiaa on käytettävissä, sitä kylmempää vettä voidaan tuottaa. Lisäksi jäähdytyskoneen hyötysuhdetta vastaava tehokerroin COP (coefficient of performance) laskee lämmönlähteen lämpötilan laskiessa. (Koskelainen et al. 2006; Sanyo 2006)

Toinen lämpöpumpputyyppejä, joka voi käyttää matalalämpötilaista jätelämpöä energianlähteenään, on adsorptiojäähdytin. Adsorptiojäähdytin on varastoiva lämpöpumppu, jossa höyrystimeltä tuleva höyry imeytetään liuoksen sijasta kiinteään materiaaliin, silikageeliin. Silikageeli kuivataan lämmöllä, jolloin kosteus höyrystyy ja se johdetaan lauhduttimeen. Lauhduttimessa höyry luovuttaa lämpöään jäähdytysveteen, jon-



ka mukana lämpö kuljetetaan esimerkiksi jäähdytystorniin. Silikageeli-vesityöainepariin perustuvalla adsorptiolämpöpumpulla voidaan tuottaa lämpötilaltaan 3–18 °C kylmää vettä ja prosessi voi hyödyntää käyttövoimanaan lämpöä jopa vain 55 °C lämpötilassa. Korkeimmillaan lämmönlähteen lämpötila voi olla noin 90 °C. Moottorivoimalaitoksen lauhduttavassa lämmönsiirtimessä talteenotettu matalalämpötilainen lämpöenergia soveltuu täten hyvin adsorptiojäähdytysprosessin lämmönlähteeksi. (Koskelainen et al. 2006)

### 6.3.3 Muita hyötykäyttökohteita

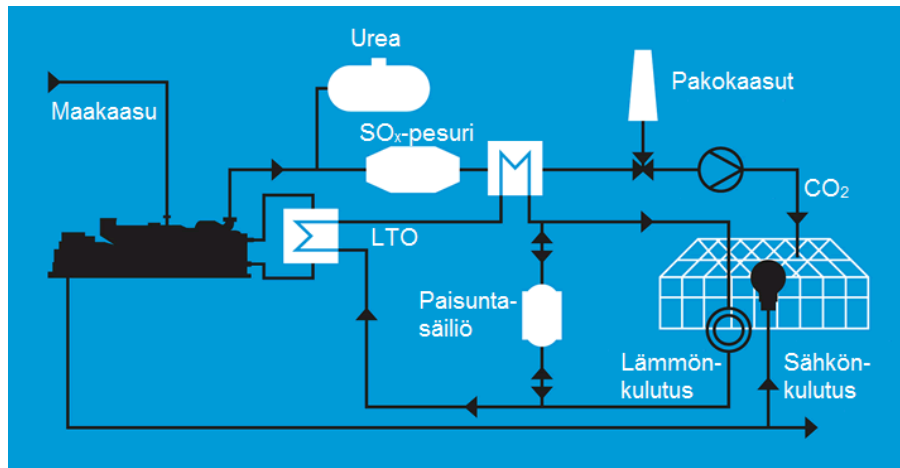
Matalan lämpötilatason lämpöenergialle on kaukolämmön ja –jäähdytyksen lisäksi myös muita hyötykäyttökohteita. Jätelämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi maakaasun esilämmityksessä ja kasvihuoneiden, stadionien tai katujen lämmitystarpeisiin.

Matala-arvoista lämpöenergiaa voidaan käyttää esimerkiksi nesteytetyn maakaasun siirron, varastoinnin ja käyttökohteiden yhteydessä. Maakaasun nesteytysprosessiin kuluu paljon energiaa, joka sitoutuu maakaasuun kylmän lämpötilan exergiana sekä paine-exergiana. Tätä exergiaa voidaan ottaa talteen ja muuntaa sähköenergiaksi hyötykäyttäen matala-arvoista lämpöä esimerkiksi LNG-terminaaleissa, nesteytetyn maakaasun höyrystämisessä tai nesteytettyä maakaasua polttoaineenaan käyttävissä voimalaitoksissa. Kryogeenisen exergian talteenotto sekä jätelämmön hyötykäyttö voidaan toteuttaa kaksivaiheisessa voimaprosessissa, jossa kryogeeninen maakaasu lauhduttaa toisiopiiirin turbiinissa paisunutta väliainetta, joka taas matalan lämpötilan lämmöllä höyrystetään ja ohjataan takaisin turbiiniin tuottamaan sähköenergiaa. Toisessa vaiheessa nesteytettyä maakaasua lämmitetään matala-arvoisella lämpöenergialla ja se paisuu turbiinissa tuottaen sähköenergiaa. Lämpöä käytetään lopuksi lämmittämään kaasumainen maakaasu siirtoverkon tai käyttäjän tarvitsemaan lämpötilaan. Prosessi voidaan yhdistää maakaasulla toimivan voimalaitoksen savukaasujen latenttilämmön talteenottoon, sillä jäähdytykseen tarvittavaa kylmää vettä on helposti saatavilla. Myös maakaasun paineenalennuslaitoksissa on lämmitystarvetta lämpötilatasolla 70–80 °C. (Qiang et al. 2004; Shi & Che 2007; Agnew et al. 2011; Mokhatab 2012)

Kasvihuoneet ovat oivallinen matala-arvoisen jätelämmön hyötykäyttökohde. Esimerkiksi Alankomaissa käytetään paljon pienen kokoluokan yhteistuotantolaitoksia kasvihuoneiden energiantuotannossa. Vuosina 2004–2008 Alankomaissa lisättiin kasvihuoneiden yhteyteen yhteistuotantokapasiteettia 500 MW vuosittain. Kasvihuoneet voivat hyödyntää voimalaitoksen savukaasuista paitsi lämpöä myös hiilidioksidia, jota kasvit tarvitsevat yhteyttämiseen. Kaaviokuva kaasumoottorin sähköä, lämpöä ja hiilidioksidipäästöjä käyttävästä kasvihuoneesta on esitetty kuvassa 6.13. (European Summary 2010; Greenhouses 2014)

Kasvihuoneiden ohella monet yhdyskuntien lämmitystarpeet voitaisiin kattaa matalalämpötilaisella jätelämmöllä. Tällaisia mahdollisia lämmityskohteita ovat urheilukentät ja –stadionit, uimahallit, katulämmitys ynnä muut. Myös esimerkiksi biopolttolaitoksia käyttävät kaasutus- ja polttolaitokset voivat hyödyntää matala-arvoista lämpöä polttoaineen kuivaukseen. (Niemi 1997; Hepola & Kurkela 2002)





**Kuva 6.13** Moottorivoimalaitoksen tuotteiden hyödyntäminen kasvihuoneessa. Muokattu lähteestä (Greenhouses 2014).

Vesi-höyrypiiriin perustuvan lämmöntalteenoton ohella lämpöä voidaan hyödyntää muihin väliaineisiin perustuvilla lämmön talteenottopiireillä. Matalalämpötilaista energiaa voidaan hyödyntää mm. ORC-piireissä ja Kalina-kiertoprosesseissa, joilla voidaan tuottaa lisää sähköä moottoriprosessin jätelämpövirroista. (Paanu 2012)

Lauhduttavalla lämmönsiirtimellä voi olla matala-arvoisen lämmön hyödyntämisen lisäksi muita etuja. Lauhduttavan lämmönsiirtimen savukaasuista erottamaa vettä voitaneen hyötykäyttää esimerkiksi jäähdytystorneissa. Kuivilla alueilla lauhdeveden talteenotto voi olla merkittävä osatekijä. Lisäksi savukaasujen lämpötilan alentaminen vaikuttaa edullisesti mahdolliseen hiilidioksidin talteenottoon. (Jeong et al. 2010)

## 6.4 Yhteenveto lauhdelämmön talteenotosta

Savukaasut sisältävät paljon vesihöyryn latenttienergiaa, joka voidaan ottaa talteen jäähdyttämällä pakokaasut kastepistettä alhaisempiin lämpötiloihin. Savukaasujen kosteuspitoisuus riippuu käytetyn polttoaineen koostumuksesta sekä ympäristöolosuhteista. Lauhduttaminen voidaan toteuttaa suoran tai epäsuoran lauhdutuksen avulla savukaasupesurissa tai lauhduttavassa lämmönsiirtimessä. Pakokaasujen ollessa puhtaita ja lämmöntalteenoton ollessa lauhduttamisen päätarkoitus, on perusteltua käyttää epäsuoraa lauhdutusta, jolloin voidaan lämmittää jäähdytysvesi korkeampaan lämpötilaan kuin suorassa lauhduttamisessa. Suora lauhdutus sopii erityisesti likaisten savukaasujen puhdistukseen ja lisälämmön talteenottoon. Lauhduttava lämmönsiirrin voidaan suunnitella toimimaan koko ajan vesihöyryn lauhtumisen alueella kostuttamalla pakokaasut kylläiseksi ennen lauhduttavaa lämmönsiirrintä, jolloin myös lauhtumisen lämpötilataso nousee korkeammalle kastepisteen nousemisesta johtuen.

Lauhdelämmön talteenottotekniikkaa on käytössä erityisesti kosteiden savukaasujen, kuten biomassan polton yhteydessä, jolloin talteenotettava latenttienergiapotentiaali on suuri ja yleensä savukaasujen puhdistus on tarpeen. Matalilla lämpötiloilla talteenotettua lämpöenergiaa voidaan hyötykäyttää kaukolämpöveden lämmittämiseen lämpöpumppusovellusten avulla tai esimerkiksi kaukojäähdytyksen lämmönlähteenä.

## 7 LAUHDUTTAVAN LÄMMÖNSIIRTIMEN LISÄÄMINEN MITOITUSOHJELMAAN JA ESIMERKKITAPAUSTEN LASKENTA

Edellä on tarkasteltu moottorivoimalaitosten pakokaasun lämpöenergian määriä ja lämmöntalteenoton mahdollisuuksia sekä talteenotetun lämmön hyötykäyttökohteita. Tässä luvussa on tarkoitus suunnitella tekninen ratkaisu lämmöntalteenotolle eli pyrkiä mitoittamaan lauhduttavan lämmönsiirtimen tarvittavat lämmönsiirtopinnat. Tarkastellaan lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoitusta esimerkkivoimalaitosten ja lämmönkäyttökohteen avulla. Lisäksi arvioidaan tuotteen kannattavuutta.

### 7.1 Lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoitus

Tämän työn yhtenä tavoitteena oli luoda laskentamalli polttomoottorin pakokaasujen latenttilämmön talteenottoa hyödyntävälle lämmönsiirtimelle sekä soveltaa laskentamallia integroimalla laskenta lämmöntalteenottokattiloiden MS Excel -pohjaiseen mitoitusohjelmaan. Täten laaditaan laskentaohjelma matalan lämpötilatason lämpöenergian lämmönsiirtopinnoille perustuen Alfa Laval Aalborg Oy:n lämmöntalteenottokattilan mitoituskäytäntöihin ja -laskentaan. Mitoitustilanteessa talteenotettavan lämpöenergian määrä ja lämpötilataso pohjautuu luvussa 5.1 esiteltyyn pakokaasun ominaisuuksien laskentaan sekä luvussa 5.2 tehtyyn tuntuvan ja latentin lämmön laskentaan. Saatavilla olevan lämpöenergian talteenottoon tarvittavan lämmönsiirtopinnan mitoitus taas perustuu luvussa 5.3 luotuun laskentamalliin.

Kuten luvussa 5.2.1 todetaan, on perusteltua pitää kuumien pakokaasujen lämmöntalteenottoon tarkoitettu höyrykattila ja kuumaa vettä tuottava lauhduttava lämmönsiirrin erillisinä piireinä, jolloin lämpötilatasot saadaan pidettyä korkeampina. Luodaan siis mitoitusohjelmaan erillinen osio matalan lämpötilatason lämmöntalteenotolle. Lauhduttava lämmönsiirrin mitoitetaan ulkomitoiltaan korkean lämpötilatason lämmöntalteenottokattilan kanssa yhteensopivaksi. Lämmöntalteenottokattilan laskennasta saadaan lähtöarvoja lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoitukseen. Näistä tärkeimmät ovat pakokaasujen poistumislämpötila kattilasta sekä putkien konfiguraatio.

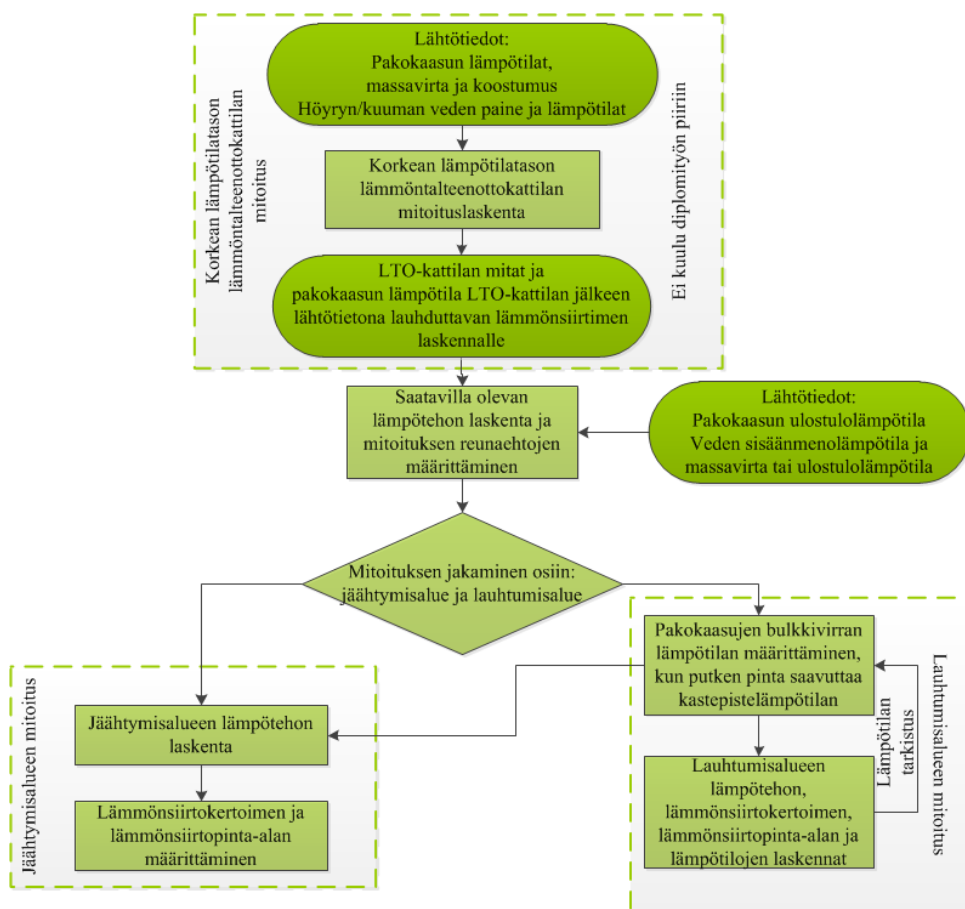
Ohjelma laskee annetun pakokaasujen poistumislämpötilan ja massavirran avulla saatavilla olevan tuntuvan ja latentin lämpötehon sekä pakokaasujen ominaisuuksien avulla kastepisteen, jonka alapuolella tapahtuu kosteuden lauhtumista. Kastepisteen perusteella lauhduttava lämmönsiirrin jaetaan kahteen alueeseen, kuvan 5.10 mukaan pakokaasujen jäähtymisalueeseen ja lauhtumisalueeseen. Ylemmän osion laskenta perustuu yrityksessä käytössä oleviin ripaputkilämmönsiirtimen laskentamalleihin. Alem-

man, lauhduttavan osion mitoitus taas perustuu luvussa 5.3.2 luotuun lämmön- ja massansiirron laskentamalliin. Laskentamallin perusteella määritellään sileistä putkista koostuvan putkipaketin keskimääräinen lämmönläpäisykerroin  $U_{\text{kok}}$  koko lauhduttavan lämmönsiirtimen alalla. Lähtöarvoina annetuista pakokaasun ja jäähdytysveden lämpötiloista voidaan laskea lämmönsiirtimen keskimääräinen logaritminen lämpötilaero, niin kutsuttu LMTD-lämpötila. Lämmitettävän kuumavesivirran sisääntulolämpötila annetaan aina lähtötietona ja vaihtoehtoisesti lämmönsiirrin voidaan mitoittaa annetulla veden massavirralla tai poistumislämpötilalla, jolloin toinen näistä saadaan laskennan tuloksena.

Siirrettävää lämpötehoa kuvaa luvussa 4.2.1 esitelty yhtälö 4.2 eli

$$Q_{\text{lto}} = U_{\text{kok}} A \Delta T_{\text{lm}} . \quad (4.2)$$

Talteenotettavan lämpötehon  $Q_{\text{lto}}$ , logaritmisen lämpötilaeron  $\Delta T_{\text{lm}}$  ja keskimääräisen lämmönläpäisykerroimen  $U_{\text{kok}}$  ollessa laskettuja, voidaan tarvittava lämmönsiirtopinta-ala  $A$  laskea. Kokonaislämpöpinta ja edellä olevan kattilan putkipituus määrittää tarvittavan lämmönsiirtoputkirivien määrän ja siten lauhduttavan lämmönsiirtimen korkeuden. Mitoitetun lämmönsiirtopinta-alan ja lasketun massansiirtokerroimen avulla voidaan yhtälöä 5.18 hyödyntäen selvittää myös vedeksi lauhtuneen vesihöyryn massavirta, joka tulee johtaa pois lämmönsiirtimen pohjalta. Mitoituslaskennan etenemistä kuvataan virtauskaaviona kuvassa 7.1.



**Kuva 7.1** Lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoituksen virtauskaavio

Mitoitusohjelmaan laaditaan mahdollisuus valita putkimateriaali, joka vaikuttaa lämmönläpäisykertoimeen ja sitä kautta lämmönsiirtopinta-alaan. Materiaalivalintoja käsittelevän luvun mukaan ruostumaton teräs sopisi lauhduttavan lämmönsiirtimen materiaaliksi sen suotuisien korroosionkeston ja lämmönjohtuvuuden ansiosta, minkä vuoksi sitä suositellaankin käytettäväksi. Mitoitusohjelman käyttäjä voi laskennassa valita putkien ulkohalkaisijan ja putkiseinämän paksuuden, joita kuitenkin käytännössä rajoittaa saatavilla olevien standardiputkien mitat. Käyttäjä voi myös valita putkien välityksen, minkä avulla voidaan vaikuttaa pakokaasupuolen painehäviöön ja lämmönsiirtoon. Laskentamalli on kehitetty sileistä putkista koostuville neliöjakoisille putkiriveille.

Lauhduttavan lämmönsiirtimen kohta, jossa putken pintalämpötila saavuttaa kastepisteen, muodostuu mitoituslaskennan kannalta olennaiseksi pisteeksi. Tämä piste jakaa lämmönsiirtimen jäähtymis- ja lauhtumisalueeseen ja muuttaa lämmönsiirrinpin-tojen laskentaa.

## **7.2 Esimerkkitapauksien laskenta**

Mitoitetaan seuraavaksi lauhduttavat lämmönsiirtimet muutamaan todelliseen moottorivoimalaan, johon on toimitettu pakokaasujen lämmöntalteenotto korkean lämpötilan alueella. Tarkastellaan mitoituslaskennan perusteella kyseisten matalan lämpötilatason lämmönsiirrinten kokoja ja kannattavuutta.

### **7.2.1 Esimerkkivoimalaitosten ja käyttökohteiden lähtötiedot**

Tehdään matalan lämpötilatason jätelämpökattilan mitoitus neljälle olemassa olevalle maakaasumoottorivoimalalle, joiden lähtötiedot on koottu taulukkoon 7.2. Voimalat sijaitsevat Turkissa, Madeiralla ja Venäjällä. Kolme laitoksista tuottaa moottorilla tuotetun sähkön lisäksi pakokaasuista talteen otetusta lämmöstä tulistettua höyryä, josta tuotetaan höyryturbiinikytkennällä lisää sähköä. Yhdessä laitoksista tuotetaan pakokaasujen lämmöntalteenoton avulla kuumaa vettä kaukolämpöverkkoon.

**Taulukko 7.2.** Esimerkkilaskennassa käytettyjen voimalaitosten perustiedot.

	<b>Turkki 1</b>	<b>Turkki 2</b>	<b>Madeira</b>	<b>Venäjä</b>
<b>Voimalaitoksen koko</b>	104 MW <sub>e</sub>	104 MW <sub>e</sub>	54,5 MW <sub>e</sub>	24 MW <sub>e</sub>
<b>Moottorit</b>	12 x Wärtsilä 20V34SG	12 x Wärtsilä 20V34SG	3 x Wärtsilä 18V50DF	4 x Wärtsilä 18V34SG
<b>Poltto-aineet</b>	maakaasu	maakaasu	maakaasu, raskas polttoöl- jy	maakaasu
<b>Lämmöntalteenotto-sovellus</b>	12 x Aalborg AV-6N luonnonkiertoi- nen rivoitettu vesiputkikattila	12 x Aalborg AV-6N luonnonkiertoi- nen rivoitettu vesiputkikattila	3 x Aalborg AV-6N luonnonkiertoi- nen rivoitettu vesiputkikattila	4 x Aalborg AV-6H rivoitettu ve- siputkikattila
<b>Lämmöntuotanto</b>	Tulistettu höyry turbiinille säh- köntuotantoon	Tulistettu höyry turbiinille säh- köntuotantoon	Tulistettu höyry turbiinille säh- köntuotantoon	Kuuma vesi kaukolämpöön

Voimalaitoksissa käytössä olevat moottorit ovat luvussa 4 tarkasteltuja Wärtsilän 34SG ja 50DF -tyyppisiä maakaasu- ja kaksoispolttoainemoottoreita. Lauhduttavan lämmönsiirtimen lämmönkäyttökohteeksi oletetaan kussakin tapauksessa matalan lämpötilatason kuumavesipiiri, esimerkiksi kaukolämpö.

### 7.2.2 Matalan lämpötilatason jätelämpökattilan mitoitus

Esimerkkivoimalaitosten matalan lämpötilatason jätelämpökattilat mitoitetaan edellä luvussa 7.1 kuvatulla tavalla mitoitusohjelman avulla. Mitoituksen alkuarvoina käytetään laitosten olemassa olevien pakokaasujen korkean lämpötilan lämmöntalteenottokattiloiden mittoja sekä pakokaasujen poistumislämpötiloja niistä. Käytössä olevien lämmöntalteenottokattiloiden mitoitus tiedot, lämpötilatasot ja kapasiteetit on koottu taulukoon liitteeseen 3. Lisäksi valittiin kaikkiin esimerkkilaskelmiin pakokaasujen poistumislämpötilaksi lauhduttavasta lämmönsiirtimestä 40 °C. Kunkin laitoksen tarkkojen pakokaasun koostumuksien puuttuessa jätelämpökattilat mitoitettiin käyttäen oletusmaakaasua ja laskennallista pakokaasua, jotka on esitelty taulukoissa 4.13, 5.1 ja liitteessä 2.

Yllä mainittujen lähtötietojen lisäksi lauhduttavan osion mitoituksessa tulee valita putkien koko ja putkivälin pituus. Putkien ulkohalkaisijaksi valittiin 30 mm, putken paksuuden ollessa 3,2 mm. Putkiväliksi asetettiin 58 mm käyttäen Osakabe et al. (2001) –lähteessä esitettyä halkaisijan ja putkivälin suhdetta 1,6. Putkimateriaaliksi valittiin ruostumaton teräs. Taulukkoon 7.3. on koottu lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoituslaskennan päätulokset. Enemmän lauhduttavien lämmönsiirtimien mitoituksen lähtötietoja ja mitoitus tuloksia on esitetty liitteessä 4.

**Taulukko 7.3.** Esimerkkivoimalaitosten lauhduttavien lämmönsiirtimien mitoituksen päätulokset.

	<b>Turkki 1</b>	<b>Turkki 2</b>	<b>Madeira</b>	<b>Venäjä</b>
Talteenotettu lämpöteho (latenttilämmön osuus)	3,5 MW <sub>th</sub> , (1,3 MW <sub>th</sub> )	3,2 MW <sub>th</sub> , (1,2 MW <sub>th</sub> )	6,6 MW <sub>th</sub> , (2,3 MW <sub>th</sub> )	1,6 MW <sub>th</sub> , (0,9 MW <sub>th</sub> )
Keskimääräinen lämmönläpäisykerroin ja tarvittava pinta-ala jäähtymisosassa (ei lauhtumista, rivoitetut putket)	33 W/m <sup>2</sup> K 889 m <sup>2</sup>	33 W/m <sup>2</sup> K 970 m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup> K 1694 m <sup>2</sup>	-
Keskimääräinen lämmönläpäisykerroin ja tarvittava pinta-ala lauhtumisosassa (lauhtumista tapahtuu, sileät putket)	248 W/m <sup>2</sup> K 290 m <sup>2</sup>	280 W/m <sup>2</sup> K 290 m <sup>2</sup>	230 W/m <sup>2</sup> K 559 m <sup>2</sup>	224 W/m <sup>2</sup> K 180 m <sup>2</sup>
Pakokaasun painehäviö	510 Pa	480 Pa	380 Pa	520 Pa

Havaitaan, että ottamalla pakokaasujen lämpötehoa edelleen talteen aina 40 °C asti voidaan Turkin ja Madeiran esimerkkivoimalaitoksissa kaksinkertaistaa lämmöntalteenottoteho. Venäjän voimalaitoksessa alkuperäinen lämmöntalteenottokattila jäähdyttää pakokaasut jo alemmalle tasolle, joten lauhduttavan lämmönsiirtimen lämpöteho lisää lämmöntalteenottoa 49 %. Pakokaasuissa on siis huomattava lämmöntalteenotto-potentiaali korkean lämpötilatason lämmöntalteenottokattilan jälkeenkin. Tämän lämpötehon talteenotolla esimerkkilaitosten kokonaishyötysuhde nousee 17–29 %. Laskentatuloksista havaitaan myös, että keskimääräinen lämmönläpäisykerroin lauhduttavan lämmönsiirtimen jäähtymisosassa, jossa pakokaasu luovuttaa lämpöä kastepisteen yläpuolella, on lähes kertaluokkaa pienempi kuin lauhtumisosassa, jossa pakokaasujen vesihöyry lauhtuu putkien pinnalle. Vaikka jäähtymis- ja lauhtumisosissa luovutetut lämpötehot ovat lähes yhtä suuret, tarvitaan jäähtymisosaan huomattavasti suurempi pinta-ala. Onkin perusteltua käyttää jäähtymisosassa rivoitettuja putkia lisäämään lämmönsiirtopinta-alaa kuten korkean lämpötilatason lämmöntalteenottokattiloissa.

Siirrettyyn tehoon nähden lauhduttavien lämmönsiirtimien aiheuttama painehäviö on myös pienempi kuin alkuperäisten lämmöntalteenottokattiloissa, mikä johtuu lauhtumisosan sileistä putkista. Yhteensä lämmöntalteenottokattilan ja lauhduttavan lämmönsiirtimen aiheuttama painehäviö esimerkkilaskelmissa on kuitenkin huomattavan suuri, 1,2–1,6 kPa, mikä voi rajoittaa lämmöntalteenottoa matalan lämpötilatason alueella. Savukaasupuhaltimien lisääminen järjestelmään on mahdollinen ratkaisu, mutta sen tuottamat investointi- ja käyttökustannukset heikentävät lämmöntalteenoton kannattavuutta.

### 7.3 Tulokset ja arviointi

Edellä esiteltiin lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoituksen laskentaprosessi sekä mitoitettiin laaditun ohjelman avulla neljälle moottorivoimalaitosesimerkille lauhduttavat lämmönsiirtimet. Arvioidaan tässä laskentamallia, esimerkkilaskennassa saatuja tuloksia sekä tehdään päätelmiä laskentaohjelman kehittämistarpeista.

Lauhtumisen lämmön- ja massansiirron laskennassa käytetään erilaisia approksimaatioita sekä oletuksia tarkan tiedon puuttuessa. Tällaisia ovat muun muassa joidenkin pakokaasun ominaisuuksien arvioiminen kostean ilman ominaisuuksilla ja matalapaineisen veden ominaisuuksien arviointi kylmän veden ominaisuuksilla kyseessä olevissa lämpötiloissa. Lämmönläpäisykertoimen laskennassa oletetaan, että pakokaasun TQ-kuvaaja on kastepisteen alapuolella lineaarinen ja siten lämmönläpäisykerroin on vakio koko lämmönsiirtimen alalla. Kuvasta 5.10 havaitaan, että siirretty lämpöteho ei riipu lineaarisesti lämpötilasta, mutta approksimaatio antaa hyvän arvion lämmönläpäisykertoimesta. Lineaarisuusarvio on hyvä, kun lämpöä otetaan talteen enintään noin 10 °C kastepisteen alapuolella. Mitä enemmän latenttilämmön talteenottoa on, sitä useampaan osaan lauhduttava lämmönsiirrin tulisi jakaa, jolloin eri osia voisi arvioida lineaarisiksi. Tarkemman tuloksen saamiseksi tulisi lämmönläpäisykerroin ja kaikki virtausaineiden ominaisuudet laskea kullekin putkiriville erikseen, jolloin laskenta kuitenkin monimutkaistuu. Laskentamalli ei myöskään ota huomioon lämmönsiirtimessä tapahtuvasta vesihöyryn lauhtumisesta johtuvan lauhdeveden valumista alapuolisten putkien pinnoille ja tämän lauhdeveden heikentävää vaikutusta lämmönsiirtoon. Muutamissa tutkimuksissa (Osakabe 2000; Shi et al. 2011) vaikutuksen oli arvioitu olevan niin pieni, ettei sen huomiotta jättäminen aiheuta suurta virhettä laskentaan. Jatkotutkimuksissa olisi kuitenkin syytä arvioida tarkemmin muodostuvan lauhdevesikalvon vaikutusta lämmönsiirtoon maakaasumoottorien pakokaasuista.

Lämmön- ja massansiirron laskentamalleissa käytetyt Nusseltin ja Sherwoodin korrelaatiot ovat kokeellisia korrelaatioita, jotka kuvaavat lämmönsiirtotilannetta erilaisissa virtaustapauksissa. Näiden korrelaatioiden valinta yhtälöissä 5.12 ja 5.21 vaikuttaa oleellisesti lämmönläpäisykertoimen määrittämiseen, minkä vuoksi niiden soveltuvuus kyseessä olevaan tilanteeseen tulisi todentaa kokeilla.

Pakokaasujen lauhduttavien lämmönsiirtimien esimerkkilaskennassa havaitaan, että lämmönläpäisykerroin lauhduttavalla alueella on noin 8-kertainen verrattuna pakokaasujen jäähtymisalueen lämmönläpäisykertoimeen. Lauhtumisalueen lämmönläpäisykerroin on hyvin korkea, minkä vuoksi sitä olisi mielekästä hyödyntää mahdollisimman hyvin. Yksi vaihtoehto voisi olla luvussa 5.2.2 tarkasteltu vesiruiskutus, jolla voidaan nostaa pakokaasun kastepiste korkeammalle. Tällöin matalan lämpötilatason lauhduttava lämmönsiirrin voisi toimia vain kastepisteen alapuolella lauhtumisen alueella eli jäähtymisosaa ei olisi ollenkaan. Näin saataisiin sama lämpöteho talteen, mutta lämmönsiirtimen koko olisi pienempi. Pienemmän lämmönsiirtimen investointikustannuksetkin saataisiin edullisemmiksi ja täten lämmöntalteenoton kannattavuus paranee.

Lauhteen ruiskutuksella nostettu kastepistelämpötila kuitenkin rajoittaisi vesipiirin läm-

pötilaa, joten yhtä korkeisiin kuuman veden lämpötiloihin ei päästäisi kuin ilman vesiruiskutusta.

Lauhduttavan lämmönsiirtimen kokoon ja samalla kustannuksiin vaikuttaa talteenotettavan tehon lisäksi monet mitoitus tekniset asiat kuten putkien välitys sekä putken koko, paksuus ja materiaali. Putkivälin valinnalla havaittiin olevan oleellinen merkitys lämmönläpäisykertoimeen ja sitä kautta putken kokoon sekä pakokaasun painehäviöön. Jos putkien välitys on suuri, pakokaasun nopeus putkien välissä pienenee ja lämmönsiirto heikkenee. Tällöin putkirivejä tarvitaan useampia. Samalla kuitenkin pakokaasun painehäviökin pienenee, sillä se on verrannollinen virtausaineen nopeuden neliöön, kuten yhtälöstä 5.37 havaitaan. Putkivälitystä tulee siis optimoida lämmönsiirrintä mitoittaessa. Putken halkaisija vaikuttaa sekä ulkopuoliseen että sisäpuoliseen lämmönsiirtokertoimeen ja virtausaineiden painehäviöihin. Putken materiaali ja paksuus vaikuttavat myös suoraan lämmönsiirtokertoimeen. Materiaalille ominainen lämmönjohtavuuskerroin on ruostumattomalle teräkselle vain noin kolmasosan hiiliteräksen lämmönjohtavuudesta, mikä aiheuttaa putken suuremman lämpövastuksen.

Pakokaasujen lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoitusta voitaisiin kehittää edelleen kattamaan erilaisia putkipaketteja kuten porrastetusti asetetut putkirivit. Jatkotutkimuksessa voisi tarkastella porrastuksen vaikutusta lämmönsiirtoon, painehäviöön ja lauhdekalvon muodostumiseen sekä tehdä päätelmiä optimaalisesta putkiasetelmasta. Lisäksi voisi tarkastella ripojen vaikutusta lauhtumiseen. Rivat lisäävät lämmönsiirtopintaa, mutta kuten esimerkkilaskelmissa havaittiin, lauhtumisalueella lämmönläpäisykerroin on jo huomattavan suuri, minkä vuoksi ripojen merkitys vähentyy verrattaessa perinteiseen pakokaasujen korkean lämpötilan lämmöntalteenottoon. Lisäksi jatkotutkimuksessa tulisi tarkastella koko lämmöntalteenottojärjestelmää, joka lauhduttavan lämmönsiirtimen ympärille tarvitaan. Erytispiirteenä lauhtuneen veden käsittely vaatii jatkotutkimusta. Putkipinnoille lauhtunutta ja sitä kautta pakokaasuista talteenotettua vettä voitaneen käsittelyn jälkeen hyödyntää esimerkiksi jäähdytystornien jäähdytysvettenä, jolloin lauhdevedelläkin voi olla arvo. Esimerkiksi Levy et al. (2011) tutkivat lauhduttavaa lämmönsiirtoa veden talteenoton kannalta.

## 7.4 Kannattavuuden arviointi

Aiemmissa tarkasteluissa on havaittu, että pakokaasut sisältävät merkittävän määrän lämpötehoa vielä korkean lämpötilatason lämmöntalteenottokattilasta poistuessaan ja että tätä lämpötehoa voidaan ottaa talteen ja hyödyntää lauhduttavan lämmönsiirtimen avulla. Vaikka lämmöntalteenottopotentiaali on merkittävä ja lauhduttavan lämmönsiirtimen lisääminen moottorivoimalaitokseen parantaa kokonaishyötysuhdetta, on investointia tarkasteltava myös taloudellisesta näkökulmasta. Arvioidaan lauhduttavan lämmönsiirtimen kannattavuutta takaisinmaksuajan avulla Euroopan toimintaympäristössä.

Investoinnin kannattavuutta voidaan arvioida esimerkiksi takaisinmaksuaikaa arvioimalla. Takaisinmaksuaika kertoo, kuinka kauan kestää, että investoinnin aiheut-



tama säästö tai tuotto ylittää investointikustannuksen. Investoinnin jälkeisinä vuosina saatavien tuottojen nykyarvo voidaan laskea yhtälöllä 7.1.

$$a_{n,i} * S, \quad (7.1)$$

jossa  $a_{n,i}$  on nykyarvotekijä ensimmäisten vuosien ( $n$ ) tuotoista korkokannalla  $i$  ja  $S$  on investoinnin aiheuttamat vuotuiset tuotot. Nykyarvotekijä voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä.

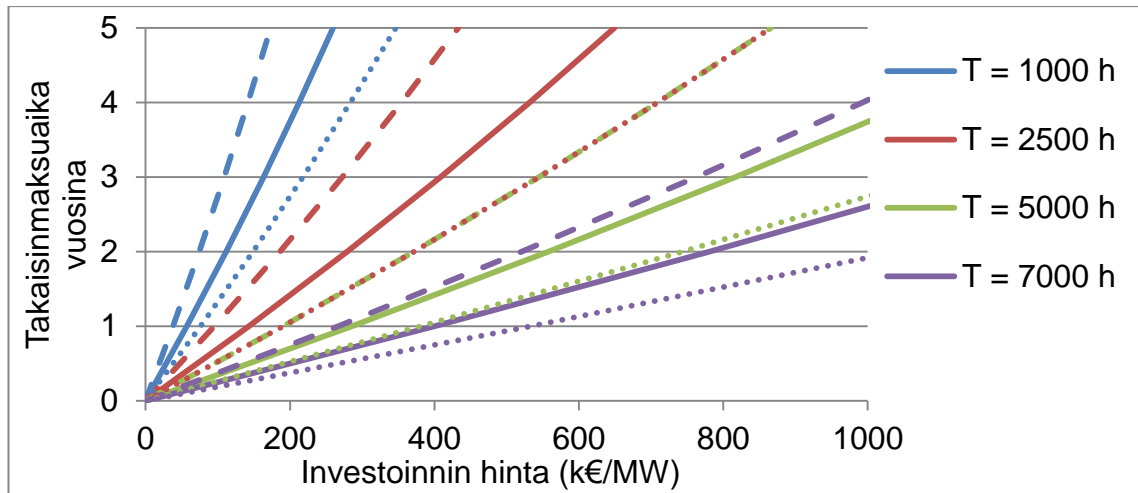
$$a_{n,i} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}. \quad (7.2)$$

Takaisinmaksuaika voidaan selvittää, kun tiedetään korkokanta ja arvioidaan tuotteen investoinnista aiheutuvat vuotuiset säästöt tai tulot. Lämmöntalteenottojärjestelmän investoinnista aiheutuu yhteistuotantolaitokselle tuloja lämpöenergian myynnistä. Näin ollen lämmön hintataso vaikuttaa lämmöntalteenottojärjestelmän takaisinmaksuaikaan ja kannattavuuteen. Seuraavassa taulukossa on listattu keskimääräisiä kaukolämmön hintoja Euroopassa vuonna 2011. Taulukosta havaitaan, että kaukolämmön hintataso vaihtelee maittain ollen alhaisimmillaan Islannissa (11 €/MWh) ja korkeimmillaan Tanskassa (100 €/MWh). Keskimäärin kaukolämmön hinta Euroopassa on 60 €/MWh. Kaukolämmön hinta on kuitenkin vain karkea arvio lämmön arvosta tuottajalle, sillä siinä ei oteta huomioon mahdollisia veroja ja myyntikatteita.

**Taulukko 7.4** Kaukolämmön keskimääräiset hinnat (€/MWh) maittain Euroopassa 2011. (District heating 2013)

AT	BE	BG	CH	CY	CZ	DE	DK	EE	ES	FI	FR	GR	HU	IE
50,3	-	38,5	81,0	-	68,8	73,0	100,1	55,5	-	53,3	65,8	-	33,5	-
IS	IT	LT	LU	LV	MT	NL	NO	PL	PT	RO	SE	SI	SK	UK
11,3	-	67,0	-	55,3	-	-	57,60	38,6	-	52,3	74,3	54,2	72,5	-

Arvioidaan esimerkkitapausten lauhduttavien lämmönsiirtimien takaisinmaksuaikaa, kun lämmön arvo on keskimääräinen Euroopan kaukolämmön hinta ja huipunkäyttöaika kaukolämmölle tyypillinen 2500 tuntia vuodessa. Jotta tuotteen takaisinmaksuaika jäisi alle kolmeen vuoteen, olisi investoinnin oltava enintään noin 409 000 euroa/MW<sub>th</sub> korkokannan ollessa 5 %. Jos halutaan saavuttaa kahden vuoden takaisinmaksuaika, investoinnin tulisi olla enintään 279 000 euroa/MW<sub>th</sub>. Huipunkäyttöajan pidentyessä tai lämmön hinnan noustessa takaisinmaksuaika lyhenee ja kannattavuus paranee. Huipunkäyttöaika vaikuttaa merkitsevästi investoinnin takaisinmaksuaikaan, mikä nähdään kuvaajasta 7.5. Kuvaaja esittää huipunkäyttöajan ja lämmön arvon vaikutusta takaisinmaksuaikaan korkokannan ollessa 5 %.



**Kuva 7.5** Lauhduttavan lämmönsiirtimen investoinnin takaisinmaksuaika huipunkäyttöajan ja lämmön arvon mukaan. Katkoviivoilla lämmön arvo on 40 €/MWh, yhtenäisillä viivoilla 60 €/MWh ja pisteviivoilla 80 €/MWh.

Lauhduttavan lämmönsiirtimen kannattavuuden määrittämisessä tulee ottaa huomioon matalalämpökorroosiosta aiheutuva perinteiseen lämmöntalteenottokattilaan verrattuna lyhyempi käyttöikä. Lauhduttavan lämmönsiirtimen investoinnin tulee maksaa itsensä takaisin ja tuottaa hyötyä investoijalle suhteellisen lyhyessä ajassa, jos oletetaan, että lämmönsiirtopinnat tai koko lämmönsiirrin tulee vaihtaa uuteen materiaalien syöpyessä. Materiaalien syöymisnopeutta on vaikea ennustaa tarkasti, mutta on oletettavaa, että korroosionkestävätkin materiaalit, kuten ruostumaton teräs ja teflonpinnoitettu teräs, syöpyvät jatkuvassa vesi- ja happokosketuksessa.

Edellä olevien laskelmien ja mitoitusohjelman karkeiden kustannus- ja hinta-arvioiden perusteella esimerkkitapausten lauhduttaville lämmönsiirtimille saatiin takaisinmaksuaika-arvioiksi noin 1,3–2,6 vuotta. Täten näyttää siltä, että investointi lauhduttavaan lämmönsiirtimeen Euroopan maakaasumoottorivoimaloissa voi olla kannattavaa, mutta kannattavuus tulee arvioida tapauskohtaisesti. Lauhduttavan lämmönsiirtimen kannattavuuteen eniten vaikuttavat lämmöntarve ja arvo sekä laitoksen tai lämmöntuoton huipunkäyttöaika. Vain osan ajasta lämpöä tuottavilla huippukuormalaitoksilla takaisinmaksuaika lämmöntalteenotolle pitenee. Lisäksi lämmön arvo vaihtelee voimakkaasti maittain ja käyttökohteen mukaan. Tässä arvioitu lauhduttavan lämmönsiirtimen takaisinmaksuaika on perinteisen, korkean lämpötilan lämmöntalteenottokattilan takaisinmaksuaikaa pidempi, mutta voimalaitosinvestoinneissa edelleen suhteellisen lyhyt, joten tuotteen edelleenkehitys on perusteltua. Esimerkiksi Che et al. (2004) arvioivat lauhduttavan lämmönsiirtimen takaisinmaksuajan lyhyemmäksi kuin lämmöntalteenottokattilan, joka ei ulotu lauhdutusalueelle.

## 8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä diplomityössä selvitettiin maakaasua polttoaineenaan käyttävien polttomoottorivoimaloiden toimintaympäristöä Euroopan energiamarkkinoilla sekä tarkasteltiin moottorien hukkalämpövirtoja ja lämmöntalteenottoa niistä. Euroopan unionin päätökset samoin kuin kansalliset energiapoliittiset tavoitteet ohjaavat energiamarkkinoita ja pyrkivät luomaan perustan turvatulle, ilmasto- ja ympäristöystävälliselle sekä tehokkaalle energiantuotannolle. Energiatehokkuutta pyritään lisäämään primäärienergian säästämiseksi ja päästöjen vähentämiseksi, minkä vuoksi myös sähkön- ja lämmön yhteistuotantoa pyritään edistämään. Maakaasun on arveltu olevan yksi osaratkaisuu puhtaamman, ilmastoystävällisemmän energian tuotantopaletissa. Maakaasua käyttävät polttomoottorivoimalaitokset ovat joustavia sähkön- ja lämmöntuotantolaitoksia, jotka voivat nopeasti reagoida kulutukseen. Moottorivoimalaitosten etuina ovat nopea rakentamisaikataulu, modulimuotoinen pystyttäminen ja laajentamismahdollisuudet kapasiteetin tarpeen mukaan, soveltuvuus säätökapasiteetiksi sekä joustavuus usein myös polttoaineen suhteen. Maakaasumoottorivoimalaitosten suosion arvioidaankin lisääntyvän juuri joustavuutensa ja puhtautensa vuoksi myös Euroopassa lähitulevaisuudessa.

Moottorivoimalaitokset tuottavat sähkövoiman lisäksi lämpötehoa, josta osa otetaan hyötykäyttöön ja osa hukataan ympäristöön. Moottorin ahtoilmaa, voiteluöljyä sekä sylinterivaippoja jäähdyttävät piirit sekä polttoprosessista poistuvat pakokaasut ovat pääasiallisia lämmönlähteitä, joista lämmön talteenotto tarjoaa mahdollisuuden energiatehokkuuden parantamiseen ja hyödyllisen lämpötehon tuotantoon. Moottorivoimalassa on yleisesti hyödynnettyjen lämpövirtojen lisäksi paljon lämmöntalteenottopotentiaalia, jolla voidaan lisätä laitoksen lämmöntuottoa ja täten kasvattaa energiatehokkuutta. Jätelämmön entistä tehokkaamman talteenoton lisäksi tulevaisuuden joustavilta energiantuotantolaitoksilta vaaditaan lämmön varastointia tuotantotarpeen tasoittamiseksi. Moottorin lämpövirroista suurimpana työssä keskityttiin pakokaasujen lämmöntalteenottoon ja havaittiin lämmöntalteenottopotentiaalia myös matalalämpötilaisissa, kosteissa pakokaasuissa. Pakokaasuihin sitoutuneen latenttilämmön osuus voi olla yli puolet kaikesta pakokaasuihin sitoutuneesta lämmöstä, ja kosteiden pakokaasujen matalan lämpötilan lämmöntalteenotto voi nostaa moottorivoimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta jopa kymmenillä prosenteilla. Pakokaasujen matalan lämpötilatason lämpöenergiaa voidaan ottaa talteen lauhduttavilla lämmönsiirtimillä, jotka jäähdyttävät pakokaasut kastepisteen alapuolelle, jolloin vesihöyry lauhtuu ja latenttilämpö vapautuu.

Yhtenä työn tavoitteena oli selvittää, onko latenttilämmön talteenoton lämpötilatasolla jätelämmölle tarvetta, ja millaisia hyötykäyttökohteita matalalämpötilaiselle jätelämmölle on olemassa. Jätelämmön hyötykäyttökohteita löydettiin useita, esimerkiksi

kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen tuotanto sekä erilaiset lämmityskohteet, kuten kasvihuoneiden ja uimahallien lämmitys. Lauhduttavan lämmönsiirtimen investointia voidaan teknisesti arvioida soveltuvien hyötykäyttökohteiden ja lämmönsiirtimen teknisten ratkaisujen sekä taloudellisesti kannattavuustarkastelujen avulla. Tavoitteena olikin selvittää, miten latenttilämpöä voidaan ottaa talteen. Latenttilämmön talteenottoon löydettiin toimivia ratkaisuja tutkimuskirjallisuudesta, joiden perusteella luotiin malli epäsuoralle lauhduttavalle lämmönsiirtimelle.

Työssä luotiin lämmön- ja massansiirron laskentamalli, jolla voidaan mitoittaa vesiputkityyppisen lauhduttavan lämmönsiirtimen tarvittava lämmönsiirtopinta-ala. Luodun mallin avulla voidaan laskea siirtyneet lämpötehot, pakokaasuista lauhtuneen veden massavirta sekä pakokaasujen ja jäähdytysveden lämpötilatasot. Laskentamalli integroitiin lämmöntalteenottokattiloiden mitoitusohjelmaan, joten sitä voidaan käyttää myynnin ja tuotekehityksen tukena pakokaasujen lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoitukseen ja kehitykseen. Laskentamallia sovellettiin neljään olemassa olevaan kaasumoottorivoimalaitokseen, joille mitoitettiin lauhduttavat lämmönsiirtimekset alkuperäisten pakokaasukattiloiden perään. Kolmessa esimerkkitapauksessa lauhduttavan lämmönsiirtimen avulla talteenotettu lämpöteho kaksinkertaistui ja yhdessä tapauksessa lämpötehoa saatiin 49 % lisää. Latenttilämpöä vapautuu kastepisteen alapuolella suuret määrät, minkä vuoksi myös lämmönsiirtoon vaadittava pinta-ala on suuri. Laskentamallin ja esimerkkitapausten avulla havaittiin, että vesihöyryn lauhtumisen alueella lauhduttavassa lämmönsiirtimessä lämmönläpäisykerroin on huomattavasti suurempi kuin pelkän pakokaasujen tuntevan lämmön talteenoton lämmönläpäisykerroin. Näin ollen lauhduttavassa lämmönsiirtimessä vaadittava pinta-ala ei kuitenkaan kasva samassa suhteessa siirrettyyn lämpötehoon kuin korkeamman lämpötilan pakokaasukattilassa.

Kannattavuusarviointia tehtiin neljälle esimerkivoimalaitokselle, joille arvioitiin investoinnin takaisinmaksuaikaa. Takaisinmaksuajaksi saatiin 1,3–2,6 vuotta, minkä perusteella lauhduttavan lämmönsiirtimen investointi voimalaitokseen voi olla kannattavaa, jos sopiva lämmönkäyttökohde on olemassa. Kannattavuuteen vaikuttavat investointikustannuksen lisäksi laitoksen huipunkäyttöaika, lämmönsiirtimen teho sekä tuotetun lämmön arvo. Täten energian ja lämmön hintojen noustessa kannattavuus paranee ja käyttöajan lyhetessä se heikkenee. Lauhduttavan lämmönsiirtimen jatkotutkimus ja tuotekehitys ovat perusteltuja tuotteen kannattavuusarvioiden perusteella.

Diplomityö onnistui vastaamaan tavoitteisiinsa selvittämällä vastaukset tutkimuskysymyksiin. Työn tuloksena syntyneen pakokaasujen lauhduttavan lämmönsiirtimen mitoituksen oikeellisuus tulisi kuitenkin lisätutkimuksissa varmistaa todellisessa tilanteessa. Laskentaa voitaisiin laajentaa lisäämällä mahdollisuus ripaputkien käyttöön sekä vertailla muun tyyppisten lämmönsiirtimien soveltuvuutta pakokaasujen lauhduttavaan lämmönsiirtoon. Myös materiaalien soveltuvuutta, korroosionkestoa ja korroosionopeutta tulisi tutkia lisää, jotta voidaan arvioida lämmönsiirtimien käyttöikää ja kannattavuutta. Pakokaasujen lauhduttavan lämmöntalteenottojärjestelmän kokonaiskustannusten arviointiin tarvitaan lisäksi selvitystä lauhdeveden käsittelystä ja mahdollisista savukaasupuhaltimista.

## LÄHTEET

Abusoglu, A. & Kanoglu, M. 2008. First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems. *Energy Conversion and Management* 49, 8, pp. 2026–2031.

Abusoglu, A. & Kanoglu, M. 2009. Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 2 – Application. *Applied Thermal Engineering* 29, 2–3, pp. 242–249

Agnew, B., Shi, X. & Che, D. 2011. Analysis of a Combined Cycle Power Plant Integrated with a Liquid Natural Gas Gasification and Power Generation System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 225, 1, pp. 1–11.

Ahnger, A. 2007. ECC with internal combustion engines. *Wärtsilä technical journal In Detail* issue 02/2007, pp. 4–6.

Aircogen [WWW]. Dresser-Rand. 2014 [viitattu 3.3.2014]. Saatavissa: <https://www.dresser-rand.com/products/CHP/aircogen.php>

Balli O., Aras H. & Hepbasli A. 2010. Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part II - An application. *Energy Conversion and Management* 51, 11, pp. 2260–2271.

Blanco, J.M. & Peña, F. 2007. Evaluation of the physical dew point in the economizer of a combined cycle burning natural gas. *Applied Thermal Engineering* 27, 11–12, pp. 2153–2158.

BP Statistical Review of World Energy 2013 [verkkodokumentti]. BP p.l.c. [viitattu 10.2.2014]. Saatavissa: [http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_2013.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf)

Calefa Oy:n verkkosivut [WWW]. 2014 [viitattu 23.6.2014]. Saatavissa: <http://www.calefa.fi/fi/ratkaisut/energia/lampolaitokset-maakaasu/>

Che, D., Liu, Y. & Gao, C. 2004. Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler. *Energy Conversion and Management* 45, 20, pp. 3251–3266.

Chen, Q., Finney, K., Li, H., Zhang, X., Zhou, J., Sharifi, V. & Swithenbank J. 2012. Condensing boiler applications in the process industry. *Applied Energy* 89, 1, pp. 30–36.

Chen, Q., Sharifi, V. & Swithenbank, J. 2010. Review of Industrial Condensing Boilers (Technology & Cost) and a Case Study: Thermal Design of a condensing boiler in a Large Scale Biomass District Heating Plant (40 MW). Sheffield University Waste Incineration Centre, EPSRC Thermal Management of Industrial Processes. 71 p.

Combined Heat and Power (CHP) data. 2013. Excel-workbook with data for CHP in the EU during 2005–2011. Updated 11 June 2013. Eurostat, European Commission. 8 worksheets.

Competition in Energy sector, Electricity [WWW]. European Commission. 2014 [viitattu 6.5. 2014]. Saatavissa: [http://ec.europa.eu/competition/sectors/energy/electricity/electricity\\_en.html](http://ec.europa.eu/competition/sectors/energy/electricity/electricity_en.html)

District heating and cooling country by country survey 2013, statistics overview. 2013. Euroheat & Power. 1 p.

Eklund T., Kytö, M. & Nylund, N.-O. 1997 Lean-burn-kaasumoottoreiden päästöjen minimointi voimantuotannossa. Espoo, VTT, Tiedotteita 1813. 60 s.

Ekokem, Jätteiden käsittelyprosessit, Voimala 1. [WWW]. Ekokem. 2014 [viitattu 18.6.2014]. Saatavissa: <http://www.ekokem.fi/fi/tietopankki/kasittelyprosessit/jatteiden-kasittelyprosessit>

Ekströms Värmetekniska:n verkkosivut [WWW]. Ekströms Värmetekniska. 2014 [viitattu 14.3.2014]. Saatavissa: <http://www.ekstromsvarme.se>

Energia Suomessa - Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. 2004. VTT Prosessit. Helsinki, Edita. 397 s.

Energiahaasteet ja -politiikka, Komission panos 22. toukokuuta 2013 kokoontuvaan Eurooppa-neuvostoon. 2013. Euroopan komissio. 9 s. + liitt. 19 s.

Energiatohokkuusdirektiivin toimeenpano - EED-työryhmän loppuraportti. 2014. Työ- ja elinkeinoministeriö, Energia ja ilmasto 4/2014. 44 s.

Energiateollisuus ry. Energiateollisuus ry:n verkkosivut [WWW]. [viitattu 13.2.2014]. Saatavilla: <http://energia.fi/>

Energiepolitik der IEA-Länder. Deutschland 2013 Prüfung. 2013. Paris, IEA – International Energy Agency. 226 p.

Energy Policies of IEA Countries. Italy 2009 Review. 2009. Paris, IEA – International Energy Agency. 188 p.

Energy Policy Highlights. 2013. Paris, IEA – International Energy Agency. 114 p.

Energy Roadmap 2050. Luxembourg 2012, European Commission. 20 p.

Energy, transport and environment indicators. Luxembourg 2012, Publications Office of the European Union. Eurostat Pocketbooks. 240 p.

EPNDir 2012/27/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta.

Eurogas Long-Term Outlook for gas to 2035. Brussels 2013, Eurogas. 16 p.

Eurogas Statistical Report 2013. Brussels 2013, Eurogas. 16 p.

Eurogas:in verkkosivut [WWW]. Eurogas. 2014 [viitattu 13.2.2014]. Saatavissa: <http://www.eurogas.org/>

European Cogeneration Review - Germany. 2013. COGEN Europe, Country Reports on Cogeneration in European countries. 15 p. + appendices 6 p.

European Summary Report on CHP support schemes a comparison of 27 national support mechanisms. CODE project report, European Summary. 2010. Cogeneration Observatory and Dissemination Europe. 28 p. + appendices 5 p.

Eurostat Tables, Graphs and Maps Interface (TGM). Combined Heat and Power data [WWW]. Eurostat, Euroopan komissio. 2014 [viitattu 5.5.2014]. Kartta luotu vuoden 2011 tiedoista EU-28 -maista. Saatavissa: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/mapToolClosed.do?tab=map&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsdcc350&toolbox=legend>

Extended energy recovery using flue gas condensation with condensate treatment. Sønderborg Waste-to-Energy plant, Denmark [verkkodokumentti]. Götaverken Miljö. 2014 [viitattu 16.4.2014]. Saatavissa: [http://www.gmab.se/documents/Sonderborg\\_ENG\\_2010\\_rev\\_lq.pdf](http://www.gmab.se/documents/Sonderborg_ENG_2010_rev_lq.pdf)

Greenhouses [WWW]. Clarke Energy. 2014 [Viitattu 4.7.2014]. Saatavissa: <http://www.clarke-energy.com/gas-type/natural-gas/greenhouse-chp/>

Hassi, S. 2014. Komission 2030 ilmastopaketti: nahkapäätös. Blogikirjoitus 22.1.2014 EU-parlamentaarikko Satu Hassin verkkosivuilla. [WWW]. [viitattu 25.6. 2014]. Saatavissa: <http://www.satuhassi.net/2014/komission-2030-ilmastopaketti-nahkapaatos/>

Heikka, J. 2013. Effects of Strong Natural Phenomena on Diesel generating Set Performance. Master of Science Thesis. Tampere. Tampere University of Technology. 76 p. + appendices 8 p.

Held, A., Ragwitz, M., Resch, G., Nemas, F. & Vertin, K. 2010. Feed-in Systems in Germany, Spain and Slovenia – A comparison. Karlsruhe, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Energy Economics Group and Energy Restructuring Agency. 41 p.

Hepola, J. & Kurkela, E. 2002. Energiantuotannon tehostaminen fossiilisiin ja uusiutuviin polttoaineisiin perustuvassa energiantuotannossa. Espoo, VTT, Tiedotteita 2155. 65 s.

Huhtinen M., Kettunen A., Nurminen P. & Pakkanen H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5 uusittu painos. Helsinki, Edita. 379 s.

Huijbregts, W.M.M. & Leferink, R.G.I. 2004. Latest advances in the understanding of acid dewpoint corrosion: corrosion and stress corrosion cracking in combustion gas condensates. *Anti-Corrosion Methods and Materials* 51, 3, pp. 173–188.

IEA Wind 2012 Annual Report. 2013. Executive Committee of the Implementing Agreement for Co-operation in the Research, Development, and Deployment of Wind Energy Systems of the International Energy Agency. 165 p. + appendices 6 p.

Iisa, K. Rikin oksidien muodostuminen ja poistaminen. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.



Jeong, K., Kessen, M. J., Bilirgen, H. & Levy, E. K. 2010. Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 11–12, pp. 2361–2368.

Kallio, S. 2014. Modeling of a Combined Heat and Power Plant. Master of Science Thesis. Tampere. Tampere University of Technology. 102 p. + appendices 7 p.

Kankkunen, K. 2009. Voimalaitosgeneraattoreiden jäähdytys. Kandidaatintyö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 30 s.

Karhu, Joonas. 2014. Tuotannon käyttöpäällikkö, Ekokem Oy. Sähköpostihaastattelu 17.7.2014.

King, M. J., Davenport, W.G. & Moats, M.S. 2013. Sulfuric Acid Manufacture. Analysis, Control and Optimization. Second Edition. Elsevier Ltd.

Koljonen, T. & Sipilä, K. 1998. Uudemman absorptiojäähdytystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. Espoo, VTT, Tiedotteita 1926. 55 s.

KOM(2014) 15 lopullinen. Ilmasto- ja energiapolitiikan puitteet vuosille 2020–2030. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. 2014. Euroopan komissio. 20 s.

Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki, Energiateollisuus ry. 566 s.

Kraft-Wärme-Kopplung, Hocheffiziente Technik zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme. 2013. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrskontrolle. 6 s.

Kraftvärmeverken Dåva 1 och 2 [WWW]. Umeå Energi. 2014. [viitattu 16.4.2014]. Saatavissa: <http://www.umeaenergi.se/om-oss/produktion/dava-1-och-2>

Levy, E., Biligren, H. & DuPont, J. 2011. Recovery of Water from Boiler Flue Gas Using Condensing Heat Exchangers. Final Technical Report. Bethlehem, Lehigh University. 155 p.

MAN Diesel & Turbo, Power Plants Programme. 2014. MAN Diesel & Turbo. Brochure. 138 p.

Marja-aho, L. 2011. Uusiutuvan energian tuet EU-maissa, selvitys uusiutuvan energian tukimalleista sähkön ja lämmön tuotannossa EU-maissa. Erikoistyö. Espoo. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu ja Energiateollisuus ry. 103 s.

Masson, G., Latour, M., Reking, M., Theologitis, I.-T. & Papoutsis, M. 2013. Global Market Outlook for Photovoltaics in 2013–2017. European Photovoltaic Industry Association.

Mills, A. F. 1999. Basic Heat and Mass Transfer. 2nd Edition. Los Angeles, Prentice Hall, Inc. 1000s.

Moilanen A., Nieminen M. & Alén R. Polttoaineiden ominaisuudet ja luokittelu. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.

Mokhatab, S. 2012. Sales Gas Transmission In: Mokhatab, S. & Poe, W. A. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. 2nd edition. Oxford, UK, Gulf Professional Publishing. 802 p.

Neuvonen, J. 2011. Lämmöntalteenottokattilan lämpötekniinen mitoitus. Kandidaatintyö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 60 s.

Niemi, S. 1997. Survey of modern power plants driven by diesel and gas engines. Espoo, VTT, Tiedotteita 1860. 70 p.

Okkes, A. G. 1987. Get Acid Dew Point of Flue Gases. Hydrocarbon Process, 66, 7, pp. 53–55.

Oksanen, A. Ilmansuojelu. 2010. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Opintomoniste. 230 s.

Orikedon biolämpökeskus: Uusiutuvaa kaukolämpöä puuhakkeesta [verkkodokumentti]. Turku, Turku Energian viestintäpalvelut. 2008 [viitattu 17.4.2014]. Saatavissa: [http://www.turkuenergia.fi/files/2313/7034/5291/Oriketo\\_esite.pdf](http://www.turkuenergia.fi/files/2313/7034/5291/Oriketo_esite.pdf)

Osakabe, M. 2000. Latent Heat Recovery from Oxygen-Combustion Flue Gas. The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Collection of Technical Papers, 2, pp.804-812.

Osakabe, M., Ishida, K., Yagi, K., Itoh, T. & Ohmasa, K. 2001. Condensation Heat Transfer on Tubes in Actual Flue Gas. Heat Transfer—Asian Research 30, 2, pp. 139–151.

Paanu, T. 2012. Lisää sähköenergiaa polttomoottorien hukkalämmöstä. Esitys Polttomoottori- ja turbotekniikan seminaarissa. Espoo, Otaniemi. 3.5.2012. 13 s.

Pandiyarajan, V., Chinna Pandian, M., Malan, E., Velraj, R., Seeniraj, R.V. 2011. Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy* 88, 1, pp. 77–87.

Partanen, H. Maakaasudiesel – Lämmitysvoimalaitos. Teoksessa: Ruottu, S., Sarkomaa, P., Simola, P., Riikonen, A., Torri, P., Savonen, A. & Häkkänen, R. 1985. Maakaasu teollisuuden ja lämpölaitosten energianlähteenä. Helsinki, Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus. 140 s.

Pounder, C. & Coulson. 2004. *Pounder's marine diesel engines and gas turbines*, 8th edition. Edited by Doug Woodyard. Butterworth-Heinemann. 884 p.

Power Purchase Agreements [WWW]. World Bank Group, Public-Private Partnership in Infrastructure Resource Center. 2014 [viitattu 6.5.2014]. Saatavissa: <http://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/sector/energy/energy-power-agreements/power-purchase-agreements>

Puoskari, V. 2014. EU uusii energia- ja ilmastopolitiikan tavoitteitaan. Artikkelitieto & Trendit -lehden verkkosivuilla 16.5. 2014. [WWW]. [viitattu 25.6.2014]. Saatavissa: <http://tietotrendit.stat.fi/mag/article/62/>

Qiang, W., Yanzhong, L. & Jiang, W. 2004. Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source. *Applied Thermal Engineering* 24, 4, pp. 539–548

Raiko, M., Lyytikäinen, R., Vessonen, K. & Mielonen, P. 1991. Voimalaitoksen hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät. Helsinki, Imatran Voima Oy. 66 s.

Raiko, R. & Saarenpää, I. Höyrytekniikka. 2010. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto. Opintomoniste. 254 s. + liitt. 27 s.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.

Rayaprolu, K. 2009. *Boilers for Power and Process*. Boca Raton, CRC Press. 717 p.

Rayaprolu, K. 2012. *Boilers. A Practical Reference*. Boca Raton, CRC Press. 565 p.

Renewable Energy Country Profiles for the European Union, June 2013 edition. 2013. Abu Dhabi, IRENA – International Renewable Energy Agency. 62 p.

Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic properties of Water and Steam. 2007. Switzerland, The International Association for the Properties of Water and Steam. 49 p.

Rökgaskondensering [WWW]. Götaverken Miljö. 2014 [viitattu 16.4.2014]. Saatavissa: [http://www.gmab.se/eng\\_rokgaskondensering.htm](http://www.gmab.se/eng_rokgaskondensering.htm)

Sanaye, S. & Khakpaay, N. 2014. Simultaneous use of MRM (maximum rectangle method) and optimization methods in determining nominal capacity of gas engines in CCHP (combined cooling, heating and power) systems. *Energy* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.018>. 14 p.

Sanyo 16 LJ type absorption chiller technical data brochure. Single-effect hot water fired absorption chillers. 2006. Carrier Oy. Brochure.

Shi, X. & Che D. 2007. Thermodynamic analysis of an LNG fuelled combined cycle power plant with waste heat recovery and utilization system. *International Journal of Energy Research* 31, 10, pp. 975–998.

Shi, X., Che, D., Agnew, B. & Gao, J. 2011. An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, 1–3, pp. 606–615.

Skrifvars, B.-J., Hupa M. Tuhka, kuonaantuminen, likaantuminen ja korroosio. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.

Solaranlagen-Portal [WWW]. 2014 [viitattu 29.4.2014]. Saatavissa: <http://www.solaranlagen-portal.com>

Suomen Kaasuyhdistys 2014. Suomen Kaasuyhdistyksen verkkosivut [WWW]. [Viitattu 13.2.2014] Saatavissa: <http://www.maakaasu.fi>

Södra Näs Vimmerby Energi AB, Biomass District Heating Plant, Sweden [verkkodokumentti]. Opet Network. 2014 [viitattu 16.4.2014]. Saatavissa: <http://www.opet-chp.net/download/wp3/d3bcase2vimmerby.pdf>

Sønderborg Kraftvarmeværk:n verkkosivut [WWW]. Sønderborg Kraftvarmeværk I/S. 2014 [viitattu 16.4.2014]. Saatavissa: <http://www.skvv.dk/>

Swithenbank, J., Finney, K. N., Chen, Q., Yang, Y. B., Nolan, A. & Sharifi, V.N. 2013. Waste heat usage. *Applied Thermal Engineering* 60, 1–2, pp. 430–440.

Trigeneration [WWW]. Clarke Energy. 2014 [Viitattu 5.5.2014]. Saatavissa: <http://www.clarke-energy.com/gas-engines/trigeneration/>

Turunen, R. & Niemi, S. Polttomoottorit. Teoksessa: Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. 2. painos. Jyväskylä, International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s.

Uusitalo, A. 2010. Polttomoottorivoimalan energiatehokkuuden parantaminen hukkalämpövirtojen sähköksi muunnolla. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 93 s. + liitt. 12 s.

Vanhanen, T. 2014. The Evolving Requirements for Smart Secondary Substations in three European Regulatory Market Environments. Master of Science Thesis. Tampere. Tampere University of Technology. 119 p. + appedinces 4 p.

Verhoff, F. H. & Banchero, J. T. 1974. Predicting Dew Points of Flue Gases. *Chem. Eng. Prog.* 70, 8, pp. 71–72.

Väre, V. 2014. Voimalaitoksen savukaasujen lämmöntalteenotto. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 80 s. + liitt. 10 s.

Waste Heat Recovery. 2007. Wärtsilä Corporation. Brochure. 6 p.

Wirth, H. 2014. Recent Facts about Photovoltaics in Germany. Freiburg, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. 91 p.

World Energy Outlook 2011. 2011. Paris, IEA – International Energy Agency. 540 p. + appendices 120 p.

Wärtsilä 34SG Engine Technology. 2011. Wärtsilä Corporation. Brochure. 16 p.

Wärtsilä 50DF Product Guide, issue 1/2012. 2012. Wärtsilä Corporation. Reference book. 174 p.

Wärtsilä Combined cooling, heating and power. 2013. Wärtsilä Corporation. Brochure. 12 p.

Wärtsilä Medium Speed Marine Diesel Engines. 2010. Wärtsilä Corporation. Brochure. 20 p.

Wärtsilä Power Plant Product Catalogue 2012, 2nd edition. 2012. Wärtsilä Corporation. Catalogue. 99 p.

Wärtsilä multi-fuel engines [WWW]. Wärtsilä. 2014 [viitattu 9.2.2014]. Saatavissa: <http://www.wartsila.com/en/power-plants/technology/combustion-engines/multi-fuel-engines>

Yli-Kerttula, J. 2014. Lämmöntalteenottokattilan mitoitusperiaatteet ja mallinnus. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 64 s. + liitt. 2 s.

ZareNezhad, B & Aminian, A. 2011. Accurate prediction of the dew points of acidic combustion gases by using an artificial neural network model. Energy Conversion and Management 52, 2, pp. 911–916.

## LIITTEET

- Liite 1: IAPWS:n korrelaatiot veden kyllästymislämpötilalle ja kyllästymispaineelle, 2 s.
- Liite 2: Savukaasuanalyysi taulukon 5.1 mukaiselle maakaasulle, 1 s.
- Liite 3: Esimerkkivoimalaitosten korkean lämpötilatason pakokaasujen lämmöntalteenottokattiloiden tiedot, 1 s.
- Liite 4: Esimerkkivoimalaitosten lauhduttavien lämmönsiirtimien mitoitustulokset, 1 s.

## Liite 1: IAPWS:n korrelaatiot veden kyllästymislämpötilalle ja kyllästymispaineelle

IAPWS:n korrelaatio veden kyllästymislämpötilalle [IAPWS 2007, s.33–35]

$$\frac{T_{\text{kyll}}}{T^*} = \frac{n_{10} + D - [(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10}D)]^{1/2}}{2}, \quad (\text{L1})$$

missä  $T^* = 1 \text{ K}$  ja

$$D = \frac{2G}{-F - (F^2 - 4EG)^{1/2}}$$

ja

$$E = \beta^2 + n_3\beta + n_6, \quad ,$$

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7, \quad ,$$

$$G = n_2\beta^2 + n_5\beta + n_8, \quad ,$$

joissa kertoimet  $n_i$  saadaan taulukosta L1 ja kyllästymispaineesta riippuva  $\beta$  seuraavasta yhtälöstä

$$\beta = (p_{\text{kyll}}/p^*)^{1/4}, \quad ,$$

missä  $p^* = 1 \text{ MPa}$ .

IAPWS:n korrelaatio veden kyllästymispaineelle [IAPWS 2007, s.33-34]

$$\frac{p_{\text{kyll}}}{p^*} = \left[ \frac{2C}{-B + (B^2 - 4AC)^{1/2}} \right]^4, \quad (\text{L2})$$

missä

$$A = \vartheta^2 + n_1\vartheta + n_2, \quad ,$$

$$B = n_3\vartheta^2 + n_4\vartheta + n_5 \quad \text{ja}$$

$$C = n_6\vartheta^2 + n_7\vartheta + n_8, \quad ,$$

joissa kertoimet  $n_i$  saadaan edelleen taulukosta L1 ja kyllästymislämpötilasta riippuva  $\vartheta$  saadaan yhtälöstä

$$\vartheta = \frac{T_{\text{kyll}}}{T^*} + \frac{n_9}{(T_{\text{kyll}}/T^*) - n_{10}}.$$



**Taulukko L1:** Veden kyllästymislämpötilakorrelaation kertoimet  $n_1$ – $n_{10}$  [IAPWS 2007, s.34].

indeksi i	kerroin $n_i$
1	$0.116\,705\,214\,527\,67 \times 10^4$
2	$-0.724\,213\,167\,032\,06 \times 10^6$
3	$-0.170\,738\,469\,400\,92 \times 10^2$
4	$0.120\,208\,247\,024\,70 \times 10^5$
5	$-0.323\,255\,503\,223\,33 \times 10^7$
6	$0.149\,151\,086\,135\,30 \times 10^2$
7	$-0.482\,326\,573\,615\,91 \times 10^4$
8	$0.405\,113\,405\,420\,57 \times 10^6$
9	$-0.238\,555\,575\,678\,49$
10	$0.650\,175\,348\,447\,98 \times 10^3$



**Liite 3:** Esimerkkivoimalaitosten korkean lämpötilatason pakokaasujen lämmöntalteenottokattiloiden tiedot.

Laitos	Turkki 1	Turkki 2	Madeira	Venäjä
Lämmöntalteenotto- sosovellus	12 x Aalborg AV-6N luon- nonkiertoinen rivoitettu ve- siputkikattila	12 x Aalborg AV-6N luon- nonkiertoinen rivoitettu ve- siputkikattila	3 x Aalborg AV-6N luon- nonkiertoinen rivoitettu ve- siputkikattila	4 x Aalborg AV-6H rivoitettu vesiputkikattila
Lämmöntuotanto	Tulistettu höyry turbiinille sähköntuotantoon	Tulistettu höyry turbiinille sähköntuotantoon	Tulistettu höyry turbiinille sähköntuotantoon	Kuuma vesi kaukolämpöön
Pakokaasujen massavir- ta	14,7 kg/s	14,3 kg/s	27,2 kg/s	10,1 kg/s
Pakokaasujen sisään- menolämpötila	390 °C	378 °C	400 °C	400 °C
Pakokaasujen ulostulo- lämpötila	190 °C	173,5 °C	191 °C	111 °C
Tuotetun höyryn/veden lämpötila, paine ja ka- pasiteetti	360 °C, 15,1 bar(a), 49,7 t/h, 3,2 MW <sub>th</sub>	348 °C, 15,3 bar(a), 47,4 t/h, 3,2 MW <sub>th</sub>	345 °C, 11,0 bar(a), 25,1 t/h, 6,2 MW <sub>th</sub>	113 °C, 119,6 t/h, 3,2 MW <sub>th</sub>
Alkuperäisen kattilan lämmönsiirtopinta-ala	1486 m <sup>2</sup> L 4640 mm W 1790 mm H 8250 mm	1648 m <sup>2</sup> L 4640 mm W 1790 mm H 8950 mm	2637 m <sup>2</sup> L 5540 mm W 2840 mm H 8810 mm	864 m <sup>2</sup> L 2830 mm W 1840 mm H 8890 mm
Alkuperäisen kattilan putkipituus	3,525 m	3,525 m	4,155 m	1,785 m
Pakokaasun painehäviö alkuperäisessä kattilassa	970 Pa	980 Pa	770 Pa	1100 Pa

**Liite 4:** Esimerkkivoimalaitosten lauhduttavien lämmönsiirtimien lähtötiedot ja mitoitustulokset.

Laitos	Turkki 1	Turkki 2	Madeira	Venäjä
<b>Lähtötiedot</b>				
Pakokaasujen ulostulolämpötila alkuperäisestä kattilasta	190 °C	173,5 °C	191 °C	111 °C
Pakokaasujen lämpötila lauhduttavan lämmönsiirtimen jälkeen	40 °C	40 °C	40 °C	40 °C
Pakokaasujen kosteuspitoisuus ja vesikastepiste	11 %, 48 °C	11 %, 48 °C	11 %, 48 °C	11 %, 48 °C
Kuuman veden lämpötilat sisään / ulos	20 °C / 70 °C	20 °C / 70 °C	20 °C / 70 °C	20 °C / 40 °C
Talteenotettu lämpöteho lauhduttavassa lämmönsiirtimessä	3,5 MW <sub>th</sub> , josta 1,3 MW <sub>th</sub> latenttilämpöä	3,2 MW <sub>th</sub> , josta 1,2 MW <sub>th</sub> latenttilämpöä	6,6 MW <sub>th</sub> , josta 2,3 MW <sub>th</sub> latenttilämpöä	1,6 MW <sub>th</sub> , josta 0,9 MW <sub>th</sub> latenttilämpöä
Kuuman veden massavirta	16,2 kg/s	15,3 kg/s	31,3 kg/s	18,6 kg/s
Lauhtuneen veden massavirta	0,57 kg/s (2052 kg/h)	0,51 kg/s (1853 kg/h)	1,02 kg/s (3675 kg/h)	0,50 kg/s (1780 kg/h)
Keskimääräinen lämmönläpäsyykerroin ja tarvittava pintala jäähdytysosassa	33 W/m <sup>2</sup> K 889 m <sup>2</sup>	33 W/m <sup>2</sup> K 970 m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup> K 1694 m <sup>2</sup>	-
Keskimääräinen lämmönläpäsyykerroin ja tarvittava pintala lauhutusosassa	248 W/m <sup>2</sup> K 290 m <sup>2</sup>	280 W/m <sup>2</sup> K 290 m <sup>2</sup>	230 W/m <sup>2</sup> K 599 m <sup>2</sup>	224 W/m <sup>2</sup> K 180 m <sup>2</sup>
Lauhduttavan lämmönsiirtimen koko	L 4640 mm W 1790 mm H 9000 mm	L 4640 mm W 1790 mm H 9030 mm	L 5540 mm W 2840 mm H 8930 mm	L 2830 mm W 1840 mm H 5790 mm
Pakokaasun painehäviö lauhduttavassa lämmönsiirtimessä	510 Pa	480 Pa	380 Pa	520 Pa
Vesipuolen painehäviö lauhduttavassa lämmönsiirtimessä	2,4 bar	2,0 bar	2,8 bar	0,7 bar
<b>Mitotustulokset</b>				